



Mesures en ligne du champ magnétique du GANIL

A. Lemarié

► To cite this version:

A. Lemarié. Mesures en ligne du champ magnétique du GANIL. Accelerator Physics [physics.acc-ph]. 2008. in2p3-00267650

HAL Id: in2p3-00267650

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00267650>

Submitted on 28 Mar 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE BASSE NORMANDIE

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le **DIPLÔME D'INGENIEUR C.N.A.M.**

en

Electronique

par

Alain LEMARIE

**MESURES EN LIGNE DU CHAMP MAGNETIQUE
DU G.A.N.I.L.**

Soutenu le 17 mars 2008

JURY

PRESIDENT : M. VU THIEN

MEMBRES : M. DUBUC
M. DOLABDJIAN
M. SENEAL
M. LOYANT

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE BASSE NORMANDIE

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLÔME D'INGENIEUR C.N.A.M.**

en

Electronique

par

Alain LEMARIE

**MESURES EN LIGNE DU CHAMP MAGNETIQUE
DU G.A.N.I.L.**

Les travaux relatifs au présent mémoire ont été effectués au GANIL,
GIE du CNRS/IN2P3 et du CEA/DSM
Sous la direction de Christian DUBUC

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier :

Monsieur Gilles SENEAL, responsable du Secteur des Accélérateurs qui m'a soutenu, encouragé et aidé tout au long de mon projet, en particulier pour sa finalisation.

Monsieur Alain COLOMBE, responsable du Groupe Alimentations et Charges, de m'avoir permis de réaliser ce projet et d'avoir mis tous les moyens à ma disposition ces derniers mois.

Monsieur Jean-Marie LOYANT, ingénieur informaticien au sein du Groupe Informatique Machine, pour son soutien au quotidien tout au long du projet et surtout pour la logistique informatique qu'il a réalisée.

Monsieur Maurice DUVAL, ingénieur magnéticien au GANIL, qui m'a aidé et guidé tout au long de la réalisation de ce travail.

Monsieur Christian DUBUC, responsable de la filière électronique du centre régional associé de Basse-Normandie du CNAM, pour m'avoir soutenu pendant ces années, pour le temps qu'il m'a consacré ces derniers mois.

Monsieur VU THIEN, responsable de la filière électronique au CNAM, pour avoir accepté de présider le jury de mon mémoire de fin d'étude.

Les membres de ce jury messieurs Gilles SENEAL, Jean-Marie LOYANT, Christian DUBUC et Christian DOLABDJIAN, pour leurs lectures approfondies du document.

Mes collègues du Groupe Alimentations et Charges, pour leur aide et les encouragements au quotidien dans ce travail. En particulier, Laurent ROUSSEAU, pour sa contribution dans la réalisation des ensembles mécaniques.

Mesdames Maria BLAIZOT, Nathalie SAUVE,

Messieurs Alain SAVALLE, Patrice LECOMTE, Eric MEDING, Patrick ROBERT, Joël JAMES, Jean-François ROZE, Arnaud TRUDEL et Robert ALVES CONDE dont l'aide et l'expertise technique se sont souvent révélées décisives.

A ma famille, pour avoir patienté et soutenu tout au long de ces années.

Table de matières

Introduction.....	7
 1 - Le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds).....	 8
1-1 - Le GANIL.....	9
1-2 - Cyclotrons.....	11
1-3 - SPIRAL.....	12
1-4 - Aimants de » guidage : dipôles et quadrupôles.....	13
1-5 - Présentation du cadre de ce développement.....	14
 2 - Problème posé et cahier des charges.....	 17
2-1 Historique.....	18
2-2 Arguments du changement.....	18
2-3 Cahiers des charges.....	19
2-4 Organisation du Projet.....	20
 3 – Mesures de champs magnétiques : Sondes de Hall – Sondes RMN.....	 21
Rappels théoriques	
3.1- Effet Hall.....	22
3.2- Sondes à Résonance Magnétique Nucléaire – RMN.....	26
 4 - Système de mesures du champ magnétique par RMN.....	 31
4.1 - Choix du système.....	32
4.2 – Développement et mise en place sur l'accélérateur.....	35
4.3 – Développement et mise en place de deux autres systèmes.....	38
4.4 – Développement d'un logiciel complet de mesure.....	40
4.4.1 – Commande contrôle du PT2025.....	40
4.4.2 - Algorithme de mesure.....	42
4.4.3 - Application dipôle.....	44
4.4.4 - Application équilibrage.....	47
4.4.5 - Application Surveillance.....	50
4.5 - Difficultés rencontrées et solutions apportées.....	56
4.5.1 – 1er exemple : La surveillance du champ des CSS dans le secteur D	57
4.5.2 – 2ème exemple : Mesure RMN sur les 3 dipôles en sortie du cyclotron CIME.....	60
4.5.3 – Mesure RMN sur un dipôle de la salle d'expérience LISE (D3).....	64
4.5.4 – Positionnements particuliers de quelques sondes RMN.....	68
4.6 – Futures évolutions.....	69

5 - Système des mesures du champ magnétique par sonde de Hall.....	70
5.1 – <i>Choix du système.....</i>	71
5.2 – <i>Développement et mise en place du système.....</i>	72
5.2.1 – <i>Quelques généralités.....</i>	72
5.2.2 – <i>Mesure du champ.....</i>	74
5.2.3 – <i>Mesure de la température.....</i>	75
5.2.4 – <i>Mesure des deux tensions</i>	75
5.2.5 – <i>Détermination de la correction de la réponse en champ en fonction de la</i> <i>température.....</i>	76
5.2.6 – <i>Intégration de la correction dans l'algorithme de mesure de la surveillance du</i> <i>champ.....</i>	79
5.3 – <i>Développements particuliers.....</i>	79
5.3.1 – <i>Sonde du dipôle en sortie de la source d'ions : II.PF.D0.HALL.....</i>	79
5.3.2 – <i>Sonde de surveillance des cyclotrons injecteurs.....</i>	81
Conclusion.....	84
Annexes.....	86
Bibliographie et références.....	98

INTRODUCTION

Dans la physique nucléaire et celle des particules, les accélérateurs se sont succédés à des échelles et des énergies toujours croissantes. Dans toutes ces installations, les champs magnétiques jouent un rôle majeur. Ils servent à confiner ou à courber les faisceaux de particules accélérés. La course aux hautes énergies a mécaniquement entraîné la course aux champs magnétiques intenses et a conduit à développer la technologie des aimants supraconducteurs et la cryogénie nécessaire à leur fonctionnement.

Autour de ces instruments s'est imposée la mesure du champ magnétique, soit pour caractériser les aimants avant leur mise en service, soit pour régler et surveiller le champ créé.

Différentes techniques de mesures se sont développées afin de répondre aux besoins spécifiques des instruments :

Mesures par bobines de flux, par sondes à effet Hall, par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN).

Au GANIL, seules les mesures par RMN et sondes de Hall sont maîtrisées et utilisées. Elles ont été retenues pour le projet.

Ce mémoire est structuré en 5 chapitres. Après une présentation du GANIL et de son organisation (chapitre 1), nous présentons le problème posé et nous établissons le cahier des charges (chapitre 2). A la suite d'un rappel théorique des principes utilisés pour les mesures magnétiques par sondes RMN et sondes de Hall (chapitre 3), nous abordons dans les chapitres 4 et 5 les systèmes développés autour de ces deux types de capteurs.

Chapitre 1

Dans ce chapitre une présentation du GANIL est faite. L'organisation générale, de ce laboratoire et du grand instrument qu'il pilote, est présentée, ce qui repère le service dans lequel le mémoire a été effectué. Le domaine d'activité est lui aussi bien identifié.

1 - Le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds)

Le GANIL [1] est un laboratoire de recherche commun à la Direction des Sciences de la Matière (DSM) du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et à l'Institut National Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS). Il est implanté à CAEN depuis 1976. Le premier faisceau a été délivré en 1982.

La vocation du GANIL est de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la physique nucléaire, de la physique atomique. Les faisceaux d'ions – de l'hélium à l'uranium – de moyenne énergie (20 à 100 MeV/nucléon), permettent d'étudier les noyaux atomiques dans des états extrêmes.

Le GANIL, laboratoire d'accueil, se veut un outil à la disposition de la communauté scientifique nationale et internationale. Les 250 agents du GANIL ont pour mission essentielle de rendre possibles des recherches expérimentales en fournissant les moyens nécessaires : faisceaux d'ions lourds, grands équipements des salles d'expériences et enregistrements informatiques des données expérimentales. Chaque année, environ 700 physiciens français et étrangers fréquentent le GANIL, pour quelques jours ou quelques semaines, afin d'y réaliser les expériences qu'ils ont d'abord préparées et qu'ils analysent ensuite dans leurs propres laboratoires.

1-1- Le GANIL

Le GANIL est un accélérateur de particules, des ions. La première mission du GANIL consiste à produire et accélérer des ions lourds. Les ions sont accélérés à l'aide du champ électrique et guidés sur

leur trajectoire grâce au champ magnétique. Après production par une source d'ions, le faisceau est accéléré en trois étapes successives :

D'abord injectés dans un cyclotron compact qui les porte à une énergie suffisante, les ions accèdent ensuite dans un premier cyclotron à secteurs séparés CSS1. Après traversée dans un dispositif «éplucheur » qui augmente leur état de charge (en moyenne d'un facteur 2,5), ils sont enfin accélérés par le cyclotron CSS2.

Dans son trajet, le faisceau est focalisé à l'aide de quadripôles magnétiques et il est également dévié sous l'influence de dipôles magnétiques.

A la fin du processus d'accélération, après extraction de CSS2, le faisceau d'ions se présente physiquement comme une succession régulière de petits nuages de particules. Chaque « paquet » d'ions est de forme cylindrique d'un rayon de quelques millimètres et d'une dizaine de centimètres de longueur. Le déplacement de charges correspond à un courant d'intensité électrique de quelques μA .

Avant de délivrer le faisceau vers les salles d'expériences, un spectromètre magnétique permet de trier en énergie les particules. Ce spectromètre est un ensemble de 4 dipôles en cascade. La précision du champ magnétique détermine celle du tri effectué.

La deuxième mission du GANIL est d'accompagner les physiciens dans leurs expériences. Il s'agit de permettre aux physiciens d'observer des réactions nucléaires. Le bombardement des noyaux d'une cible de matière, par un faisceau constitué d'autres noyaux lancés à très grande vitesse par l'ensemble accélérateur, provoque des collisions nucléaires. La cible est entourée de dispositifs de détection qui enregistrent les signaux des phénomènes produits. Ils seront ultérieurement analysés afin de reconstituer à posteriori le déroulement d'une collision et de permettre ainsi de décrypter les propriétés du noyau atomique.

Il est évident que les systèmes de production et de mesure jouent un rôle particulièrement important dans l'instrument. Nous en déclinons quelques exemples dans les paragraphes suivants.

1-2 Les cyclotrons

Le principe du cyclotron est déjà ancien. C'est un accélérateur circulaire inventé [2] par E.O. LAWRENCE en 1931. Les particules chargées, les ions dans ce cas, sont soumises à deux types de forces, magnétiques et électriques, qui les maintiennent sur une trajectoire circulaire de rayon proportionnel à leur vitesse. A chaque passage entre les électrodes accélératrices, les ions reçoivent un supplément d'énergie qui les place sur une orbite de rayon croissant. Compte tenu du caractère périodique de la rotation, l'accélération est engendrée par un générateur de tension alternative dont la fréquence est synchrone avec celle de la rotation des ions.

Quelle que soit la technologie de cyclotron utilisée, le processus est confiné dans un volume restreint grâce au champ magnétique des aimants. Les cyclotrons peuvent être compacts (cf. figure I-1) ou à secteurs séparés (cf. figure I-2). La répartition du champ magnétique en secteurs permet en particulier une meilleure accessibilité à l'intérieur du cyclotron mais aussi une focalisation verticale du faisceau.

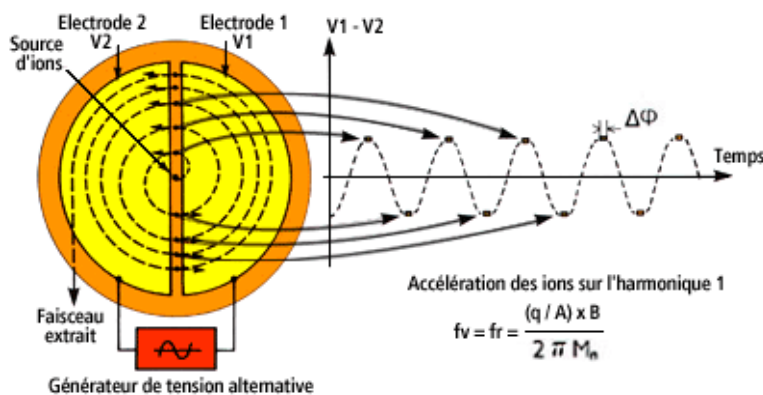


Figure I-1 : Principe du cyclotron compact

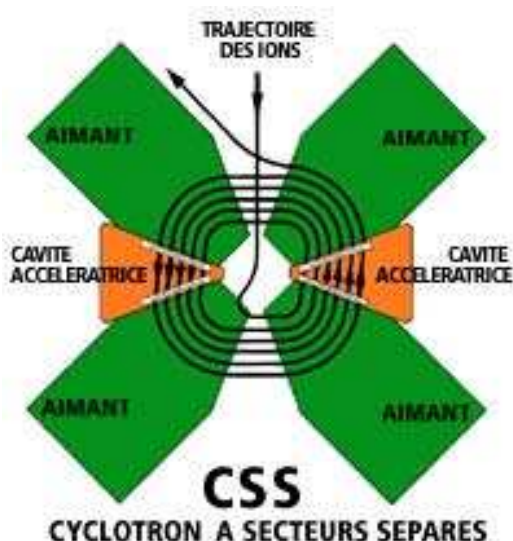


Figure I-2 : Principe du cyclotron à secteurs séparés.

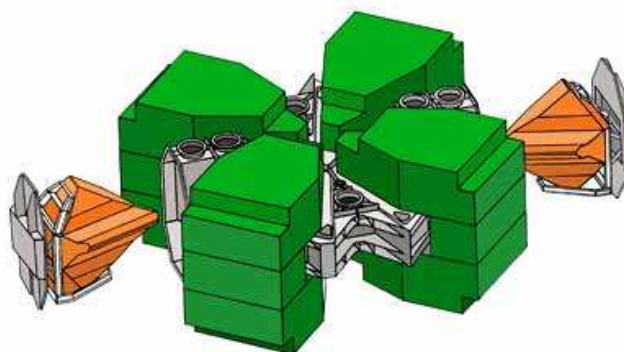


Figure I-3 : Vue en 3D du cyclotron à secteurs séparés.

Les quatre électroaimants, dont la culasse est en forme de C, viennent enserrer la chambre à vide (cf. figure I-3).

Il est évident que la surveillance du fonctionnement de l'accélérateur et son réglage en vue de maintenir les caractéristiques du faisceau sont fondamentaux dans le bon déroulement des expériences.

La mesure du champ magnétique va répondre en partie à ces exigences.

1-3 SPIRAL

Après quinze années de service, il s'est avéré nécessaire de compléter l'équipement par un système qui permet de produire et d'accélérer, en quantité et en qualité suffisantes, des ions exotiques instables, à partir d'un faisceau d'ions stables produit par le GANIL.

On bombarde pour cela une cible dont l'interaction avec les projectiles donne alors naissance à une grande variété d'isotopes, qualifiés d'instables, car la plupart d'entre eux ont une durée de vie très brève, de quelques millièmes de seconde à quelques minutes. Il est évident que pour être utilisables ces éléments doivent avoir un temps de parcours de la source au point d'utilisation inférieur à cette durée de vie. A la sortie de l'ensemble cible-source, un spectromètre permet de se débarrasser des noyaux indésirables. Ce faisceau d'ions radioactifs est alors accéléré dans le cyclotron CIME puis injecté dans la ligne de faisceau vers les salles de physique.

Là encore la mesure et la surveillance du champ magnétique de cet accélérateur est primordiale pour l'optimisation des réglages.

Les cyclotrons accélérateurs en cascade et les lignes de faisceau sont présentés ci-dessous.

(cf. figure I-4)

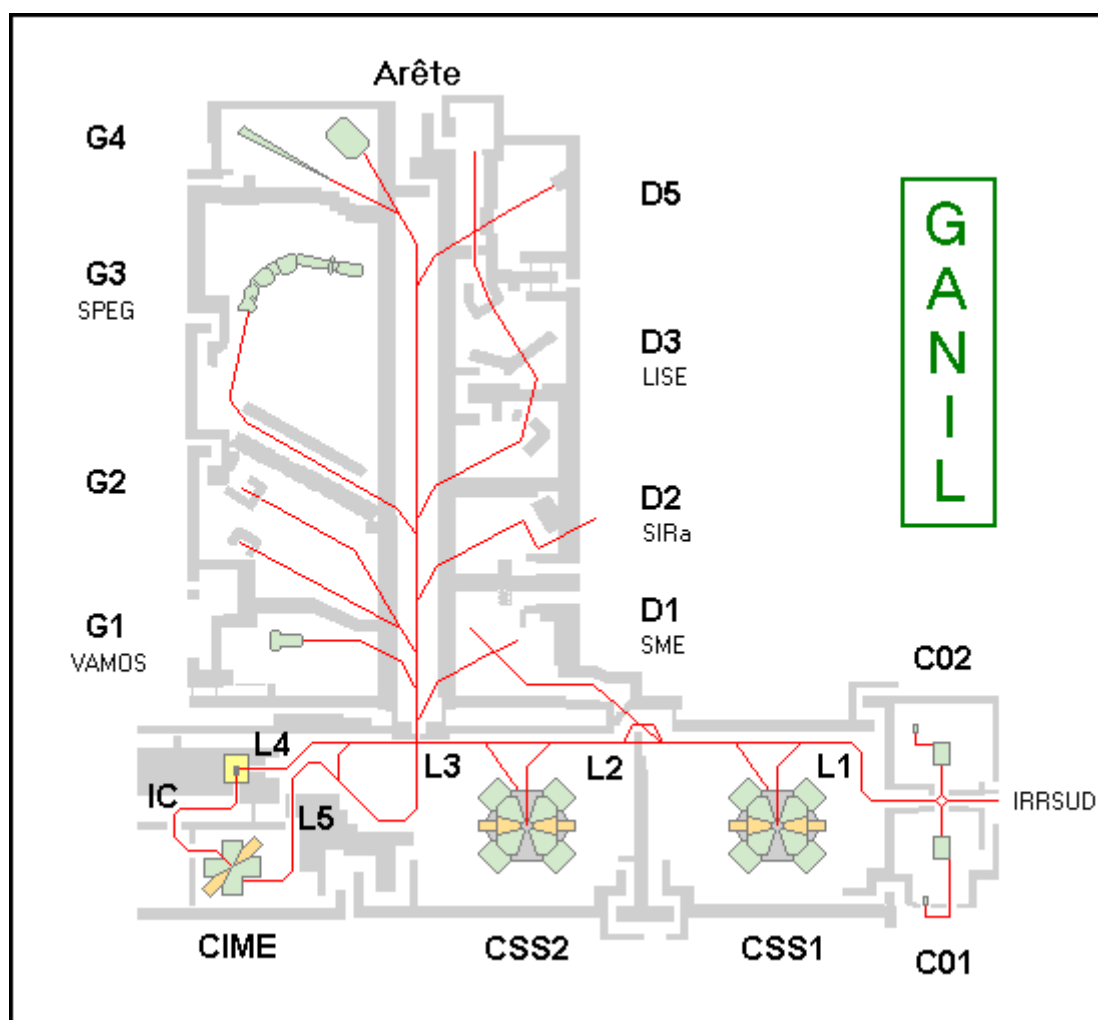


Figure I-4 : Plan général du GANIL

1-4 Aimants de guidage : dipôles et quadrupôles

De la source à la cible, selon les expériences, les ions parcourent une distance d'environ 10 km en quelques $1/10^{\text{ème}}$ de seconde. Pour les guider, quelques 130 quadrupôles et 30 dipôles assurent leur focalisation et leur déviation, jusqu'à la salle d'expérience LISE par exemple.

A tous les niveaux le champ magnétique des dipôles doit être mesuré pour assurer les réglages et la surveillance.

1 -5 -- Présentation du cadre de ce développement.

Après avoir présenté la partie scientifique et technique du GANIL, ce paragraphe propose une description de l'organisation des ressources humaines et la place de notre groupe dans cette structure.

Le GANIL est divisé en 3 secteurs, Secrétariat Général, Secteur Techniques de la Physique, Secteur Des Accélérateurs. Quelques personnes sont directement rattachées à la direction. (cf. figure I-5)

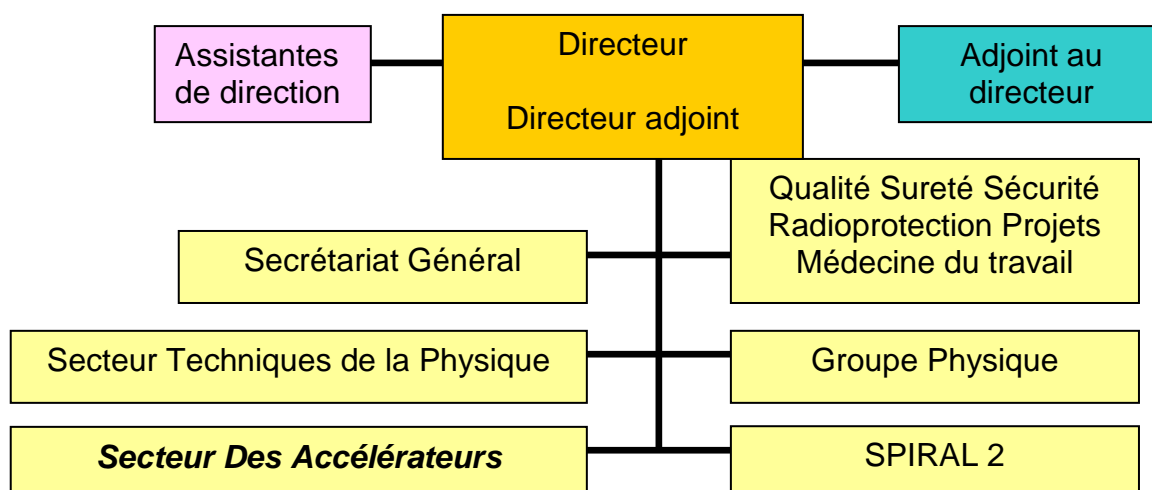


Figure I-5 : Organigramme du GANIL

Le Secteur **Des Accélérateurs (SDA)** a pour mission de produire, d'accélérer et de fournir un faisceau d'ions à la physique. Ce secteur coordonne des groupes techniques dont le **Groupe Alimentations et Charges (GAC)** (cf. figure I-6).

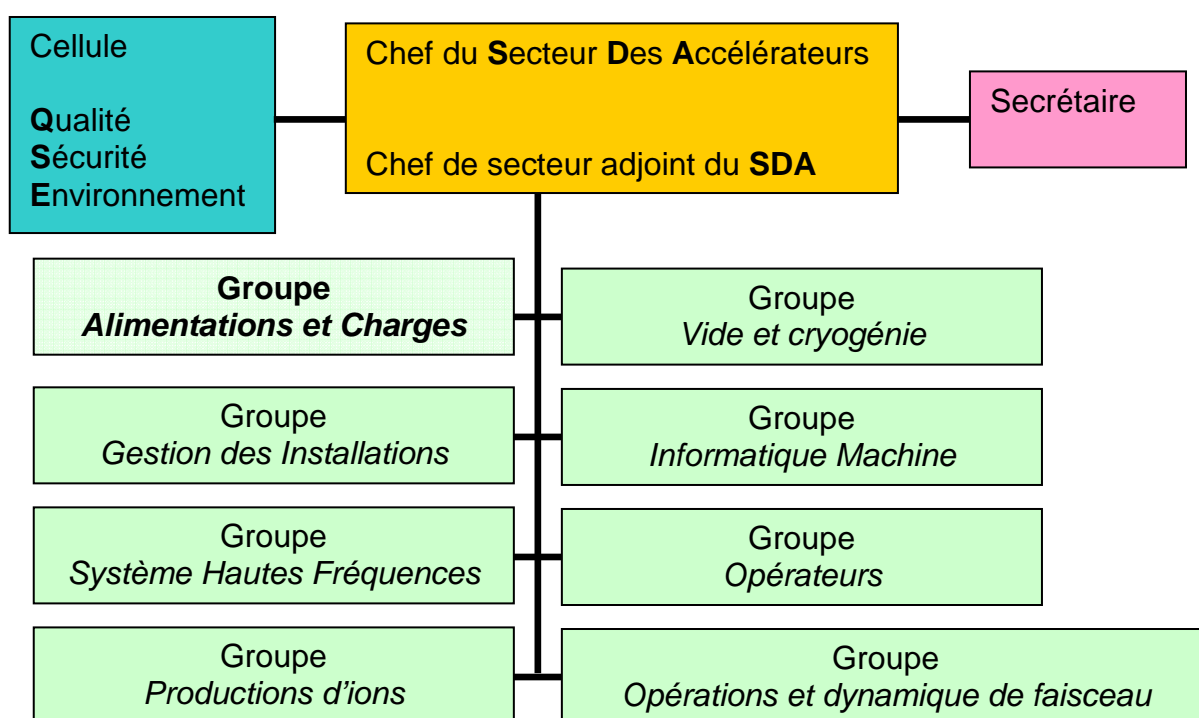


Figure I-6 : Organigramme du SDA (Secteur des Accélérateurs)

C'est dans le groupe Alimentations et Charges que ce mémoire a été effectué. On a vu dans les paragraphes précédents l'importance des électroaimants. Le service est responsable des alimentations, produisant les champs électriques et magnétiques, ainsi que des électroaimants, soit plus de 680 alimentations de courant et de tension et environ 760 électroaimants ou charges (cyclotrons, dipôles, quadrupôles, sextupôles, solénoïdes). De plus, le service doit assurer les mesures magnétiques au GANIL.

Les alimentations régulées en courant pour les électroaimants mettent en jeu de fortes puissances. La plupart des bobinages de ces électroaimants sont refroidis par circulation d'eau. Des sécurités thermiques et hydrauliques sont donc mises en place sur chaque aimant pour assurer la sécurité du matériel et des automates gèrent ces sécurités en intervenant directement sur les alimentations.

L'ensemble de ces fonctionnalités est de notre responsabilité. Une grosse part de l'activité comprend également les mesures magnétiques. Cette tâche consiste à la fois à établir les cartographies magnétiques des aimants avant leur installation et à mesurer en ligne le champ, depuis la production du faisceau jusqu'à son exploitation dans les salles de physique.

L'étude, la conception, le développement, la réalisation et la mise en service de systèmes de mesures de champ magnétique en ligne ont constitué le cœur du travail qui va être présenté.

Chapitre 2

Problème posé et cahier des charges

Dans ce chapitre, les motivations du projet ainsi que l'élaboration du cahier des charges sont présentées.

2 - Problème posé et cahier des charges.

2-1 Historique

L'importance de la mesure de champ magnétique, du point de vue des réglages de l'accélérateur et du maintien des caractéristiques du faisceau, a été soulignée dans le chapitre précédent.

Dès le début de l'exploitation du GANIL en 1982, nous avons participé à la mise en place des premiers systèmes de mesures. Il s'agissait alors d'un magnétomètre à RMN 27 voies qui cohabitait avec 6 autres, simple voie. L'ensemble permettait de mesurer le champ des dipôles et des 8 secteurs des deux CSS. Ces systèmes étaient entièrement manuels et un oscilloscope devait être associé au magnétomètre afin de visualiser le signal de résonance et ainsi permettre la mesure. Tout ce matériel était installé au poste de commande principal (PCP).

Une première évolution, en 1990, a consisté à relier le magnétomètre 27 voies au système informatique de l'accélérateur. Pour ce faire, avec l'aide du groupe informatique, un premier algorithme de recherche automatique du signal de résonance a été développé par nos soins.

2-2 Arguments du changement

Un certain nombre d'inconvénients et de limitations ont conduit, à la fin des années 90 à envisager un nouveau système de mesures de champ sur l'accélérateur.

Parmi les inconvénients figurait la complexité du système. Sa capacité maximale était largement atteinte et plusieurs autres systèmes de mesures, entièrement manuels, avaient été mis en place ponctuellement au fil des années selon les besoins et encombraient le poste de commande de l'accélérateur.

De plus la technologie de ces différents appareils datant de la fin des années 70, leur maintenance devenait de plus en plus difficile à effectuer.

2-3 Cahiers des charges

2-3-1 Mesure par sonde RMN

Ces constatations nous ont amené à établir un cahier des charges d'un nouveau système de mesures de champ par RMN.

Le système doit avoir une précision relative meilleure que 10^{-6} entre quelques mT et 2 T. Il doit pouvoir être évolutif, afin de répondre aux besoins futurs du GANIL, et modulaire afin de répartir l'achat du matériel et la mise en service sur plusieurs exercices budgétaires. Il doit pouvoir supporter des distances jusqu'à 200 mètres entre l'appareil de mesure et les capteurs.

Il est souhaité que le système retenu soit issu d'une société connue dans le monde des mesures magnétiques, afin de disposer d'un appareil industrialisé dont la pérennité soit assurée sur plusieurs années.

L'interfaçage informatique doit répondre à un standard déjà utilisé au GANIL ou qui ne nécessite pas de gros développements. La prise en compte des deux derniers critères doit permettre ainsi de minimiser les ressources humaines mobilisées pendant le développement.

2-3-2 Mesure par sonde Hall

Constatant les limitations des sondes précédentes, comme nous le verrons plus loin, le projet du système de mesure de champ par sonde de Hall est venu dans un deuxième temps. Un deuxième cahier des charges a été établi.

La précision relative souhaitée est de l'ordre de quelques 10^{-5} entre quelque mT et 2 T. La mesure doit pouvoir être faite en tout point de l'entrefer de l'aimant en particulier en zone de champ inhomogène. Le système doit être issu d'une société industrielle et doit être d'un coût inférieur au précédent. La mesure doit s'intégrer au maximum dans des solutions déjà en service au GANIL, toujours dans le but de réduire le temps de développement et ainsi de minimiser les ressources humaines.

2-4 Organisation du Projet

La responsabilité totale du projet nous a été confiée. Le séquençement des tâches a été le suivant :

- Rédaction des différents cahiers des charges.
- Recherche des différents systèmes sur le marché.
- Evaluation de chaque solution.
- Choix d'une première solution et premiers tests d'évaluation.
- Etablissement d'un planning de mise en place du système sur cinq années (1998 à 2003).
- Etablissement d'un budget sur ces années.

Une revue de projet a permis à nos responsables de valider ces choix.

- Achat des premiers matériels.
- Développement du système complet de mesure.
- Recherche et optimisation des positions de mesure.
- Développement de la mécanique de positionnement des sondes
- Mise en place du câblage avec une consultation d'entreprises.
- Mise en place des premières sondes et de la mécanique de positionnement.
- Intégration du processus de mesure dans le système informatique du GANIL.
- Test des premières sondes installées.
- Test des programmes de mesures associés.

La réception et la validation du système de mesure s'est effectuée à l'issue de chacune des phases de l'installation.

Le séquençement des tâches pour le projet de mesures par sondes de Hall a sensiblement été identique et s'est étalé de 2004 à 2007.

Chaque étape a nécessité de faire appel à des compétences dans différents groupes techniques du GANIL. Nous avons choisi de ne pas décrire dans ce mémoire les collaborations diverses que nous avons du mobiliser.

Chapitre 3

Mesures de champs magnétiques : Sondes de Hall – Sondes RMN

Dans ce chapitre, des rappels théoriques concernant les principes utilisés dans les capteurs de champ du projet sont donnés.

3 - Mesures de champs magnétiques : Sondes de Hall – Sondes RMN (Rappels théoriques)

Par abus de langage B le champ d'induction magnétique ou densité de flux magnétique est appelé champ magnétique dans tout ce document. Par ailleurs, les grandeurs vectorielles sont notées en gras dans les équations.

3.1- Effet Hall [3], [4], [5]

Lorsqu'un courant traverse un barreau en matériau semi-conducteur (ou conducteur), et si un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une différence de potentiel, appelée tension de Hall, proportionnelle au champ magnétique et au courant apparaît entre les faces latérales du barreau (cf. figure 3-1).

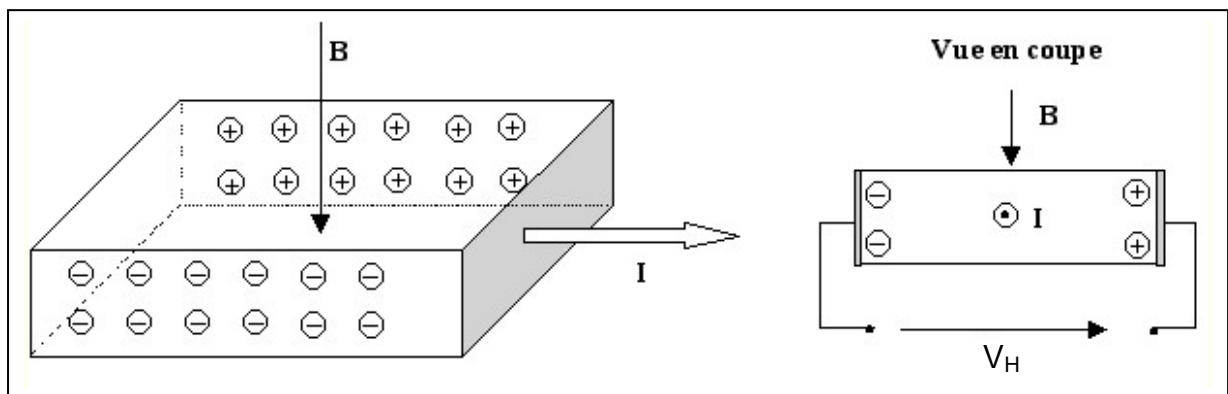


Figure 3-1

Cette tension est proportionnelle à la vitesse de déplacement des porteurs de charge qui est considérablement plus grande dans les matériaux semi-conducteurs que dans les conducteurs métalliques.

La physique classique de l'effet Hall

On sait qu'un champ magnétique agit sur les charges en mouvement. Le courant qui traverse le matériau conducteur est produit par des charges qui se déplacent avec une vitesse que

l'on notera \mathbf{v} . Ces charges sont les électrons libres dans les conducteurs, elles peuvent être des électrons ou des trous dans les semi-conducteurs.

Considérons le cas où le courant est dû à un transport d'électrons de charge $-q$. La force qui s'exerce sur chaque électron s'écrit :

$$\mathbf{F}_m = -q * \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}. \text{ (Force de Lorentz),} \quad \text{Equation 3-1}$$

Il en résulte un déplacement d'électrons et une concentration de charges négatives sur l'un des côtés du matériau ainsi qu'un déficit de charges négatives du côté opposé. Cette distribution de charges donne naissance à un champ électrique \mathbf{E}_H , lui-même responsable d'une force \mathbf{F}_e agissant sur les électrons :

$$\mathbf{F}_e = -q * \mathbf{E}_H \text{ (Force de Coulomb).} \quad \text{Equation 3-2}$$

L'équilibre est atteint lorsque la somme des deux forces est nulle, c'est-à-dire quand :

$$\mathbf{E}_H = -\mathbf{v} \wedge \mathbf{B} \quad \text{Equation 3-3}$$

La figure 3-2 montre les forces et les vecteurs impliqués dans le phénomène.

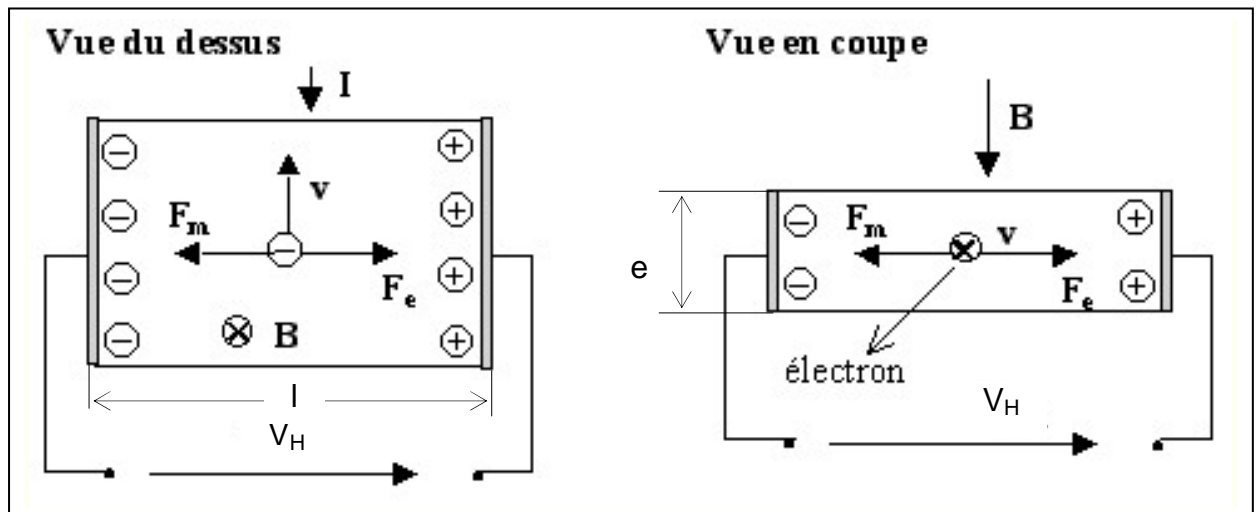


Figure 3-2

Exprimons la tension de Hall V_H dans le cas d'un barreau d'épaisseur e et de largeur l

V_H est la circulation du champ E_H sur la largeur l : $V_H = v \cdot B \cdot l$ ¹ **Equation 3-4**

Or, si la densité d'électrons libres par unité de volume est notée n , le nombre dN d'électrons traversant la surface ($l \cdot e$) pendant le temps dt est $dN = n \cdot l \cdot e \cdot dx$, où dx est la distance parcourue pendant le temps dt .

Puisque chaque électron porte une charge $-q$ et que nous avons noté v la vitesse dx/dt , le courant I s'écrit :

$$I = q \cdot dN/dt = q \cdot n \cdot l \cdot e \cdot v \quad \text{Equation 3-5}$$

Et finalement ; $V_H = 1 / qn \cdot I B / e$ **Equation 3-6**

Le terme $\gamma_H = 1/qn$ est caractéristique du capteur. Il dépend de la température car la densité n de porteurs libres en dépend.

En réalité, la situation est plus complexe dans les capteurs de Hall : le barreau est le plus souvent réalisé dans un semi-conducteur extrinsèque dont la densité des porteurs libres majoritairement ne dépend pas de la température. Dans ce cas la variation de la tension de Hall en fonction de la température est due à la variation de mobilité et d'autre part au fait que le semi-conducteur passe progressivement dans sa région intrinsèque lorsque la température augmente. Les constructeurs mettent en œuvre diverses méthodes pour minimiser ces effets dus à la température. Malgré cela les dérives du facteur γ_H avec la température sont à prendre en compte pratiquement.

Applications de l'effet Hall

D'après ce qui vient d'être exposé, les capteurs à Effet Hall permettent de mesurer directement les champs magnétiques. Ils peuvent donc être mis en œuvre dans des magnétomètres. Par ailleurs, des contre-réactions de champ dans des circuits excités par des courants électriques

¹ On peut remarquer que si B n'est pas orthogonal au plan du capteur mais est tel que l'angle (B, v) est égal à θ , cette expression devient : $V_H = v \cdot B \cdot l \cdot \sin\theta$ **Equation 3-4bis**

permettent grâce à des capteurs de Hall de mesurer sans contact l'intensité de ces courants, on parle alors de capteurs de courant à Effet Hall

L'effet Hall permet également de réaliser des capteurs ou des détecteurs de position sans contact, utilisés notamment dans l'automobile, pour la détection de position d'un arbre tournant (boîte à vitesse, cardans, ...).

La fonction de détection de position sans contact se rencontre également dans des applications diverses : on trouve par exemple des capteurs à effet Hall sous les touches des claviers des instruments de musique modernes (orgues, orgues numériques, synthétiseurs), ce qui évite ainsi l'usure que subissaient les contacteurs électriques traditionnels.

Les principaux avantages de ces capteurs pour la mesure de champ magnétique sont liés à leur faible taille (quelques mm à quelque 1/10 de mm) : le faible encombrement mécanique du capteur permet une mesure locale et spatialement bien définie. Ils sont assez peu coûteux et d'exploitation relativement simple. Leurs inconvénients sont essentiellement imputables à leur relative sensibilité aux variations de température et à une certaine fragilité dans des environnements radiologiques hostiles. Les défauts de linéarité de ces capteurs nécessitent un étalonnage complet de la chaîne de mesure dès lors que la gamme de champ est étendue.

3.2- Sonde à résonance magnétique nucléaire - RMN [6], [7], [8], [9]

Le noyau d'un atome est assimilé à une particule physique chargée tournant autour d'un axe. Le mouvement de rotation (ou spin) engendre ainsi un moment magnétique $\vec{\mu}$ et un moment cinétique \vec{J} qui sont colinéaires. Lorsque ce noyau est placé dans un champ magnétique \vec{B}_0 dont la direction fait un angle θ avec $\vec{\mu}$, on peut décrire le phénomène de résonance par la mécanique classique. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous limiterons à cette approche.

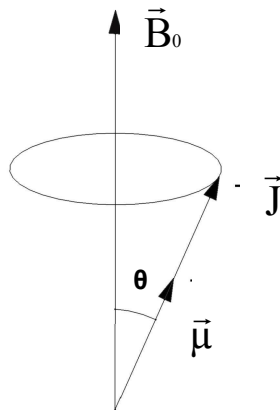


Figure 3-3

Sous l'influence du champ \vec{B}_0 le moment magnétique $\vec{\mu}$ est soumis à un ensemble de forces dont le moment, le « couple », s'écrit $\vec{\mu} \wedge \vec{B}_0$ et tend à aligner le moment magnétique $\vec{\mu}$ sur \vec{B}_0 . Mais $\vec{\mu}$ et \vec{J} étant colinéaires, ces deux vecteurs conservent le même angle θ par rapport à \vec{B}_0 (cf. figure 3-3). Le moment cinétique et le moment magnétique vont suivre un mouvement périodique de précession autour de \vec{B}_0 à la pulsation ω_p , à la manière d'un petit gyroscope.

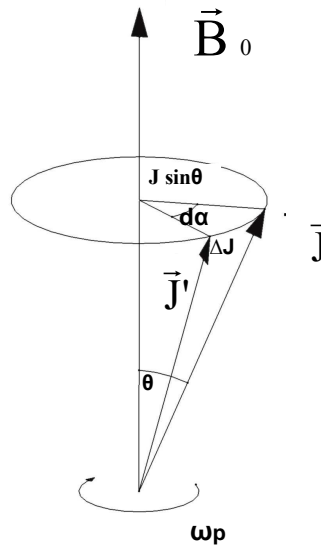


Figure 3-4

Les caractéristiques du mouvement sont déterminées par l'analyse suivante :

Pendant un temps Δt , l'angle de précession est $d\alpha = \omega_p * \Delta t$ et le moment cinétique \vec{J} passe de \vec{J} en \vec{J}' (cf. figure 3-4). La variation du moment cinétique peut donc s'écrire :

$$\Delta J = (J * \sin \theta) * (\omega_p * \Delta t)$$

Il en résulte une vitesse de variation du moment cinétique qui s'exprime par :

$$dJ/dt = \omega_p * J \sin \theta$$

En écrivant que cette vitesse est égale au couple $\mu * B_0 * \sin \theta$, il en résulte que :

$$\omega_p = \mu / J * B_0 \quad \text{Equation 3-7}$$

Si l'on pose $\omega_p = 2\pi F_p$, F_p , « fréquence de LARMOR » s'écrit donc :

$$F_p = 1 / 2\pi * \mu / J * B_0 \quad \text{Equation 3-8}$$

On constate que F_p est proportionnel au champ appliqué. Le facteur de proportionnalité, appelé rapport gyromagnétique est

$$\gamma = \mu / J \quad \text{Equation 3-9}$$

Sa valeur est connue avec une précision d'environ 3 ppm

Pour les protons : $\gamma = 42.5762 \text{ MHz/T}$

Pour les deutérons : $\gamma = 6.33569 \text{ MHz/T}$

La mesure du champ magnétique revient alors à mesurer cette fréquence. Dans les gammes de champ que nous avons à exploiter (≈ 0.04 à 2 T), F_p prend des valeurs qui vont de 1 MHz à 90 MHz. La magnétoétrie RMN va consister à mettre en résonance ce phénomène avec des excitations magnétiques radiofréquences (RF).

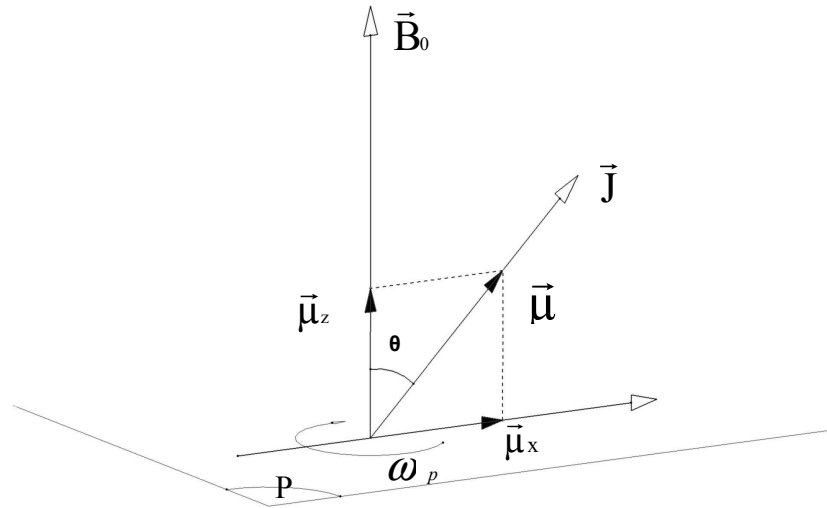


Figure 3-5

Lorsqu'un ensemble de noyaux est soumis à un champ magnétique \vec{B}_0 , la résultante μ des moments magnétiques nucléaires a une composante, $\vec{\mu}_z$ dans la direction de \vec{B}_0 , et une composante, $\vec{\mu}_x$, orthogonale à \vec{B}_0 , qui tourne à la fréquence de LARMOR (cf. figure 3-5). Si l'on applique à cet ensemble un champ d'induction magnétique transverse, c'est-à-dire orthogonal au vecteur \vec{B}_0 dans le plan P et si on fait tourner ce champ en synchronisme avec la rotation de la composante $\vec{\mu}_x$ dans le plan, on provoque alors un phénomène de résonance, avec un échange d'énergie entre le champ d'excitation et les noyaux.

La rotation du champ d'excitation est obtenue à partir d'une bobine radiofréquence disposée perpendiculairement au champ \vec{B}_0 et excitée à la pulsation ω (cf. figure 3-6).

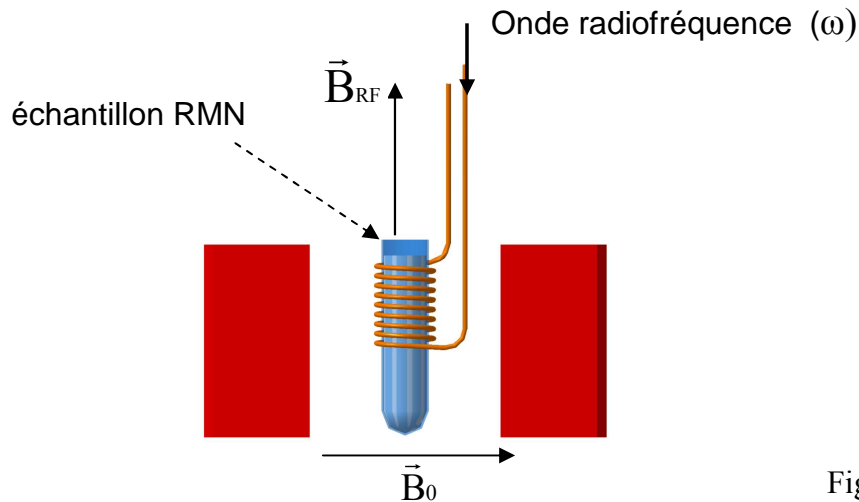


Figure 3-6

Le champ d'induction B_{RF} variant comme $A \cos \omega t$ équivaut à deux champs de direction de rotation opposées et d'amplitude moitié (Théorème de LEBLANC).

$$A \cos \omega t \vec{V}_x = A/2 (\cos \omega t \vec{V}_x + \sin \omega t \vec{V}_y) + A/2 (\cos (-\omega t) \vec{V}_x + \sin (-\omega t) \vec{V}_y) \quad \text{Equation 3-10}$$

\vec{V}_x et \vec{V}_y étant les vecteurs unitaires dans les directions respectives x et y (cf. figure 3-7)

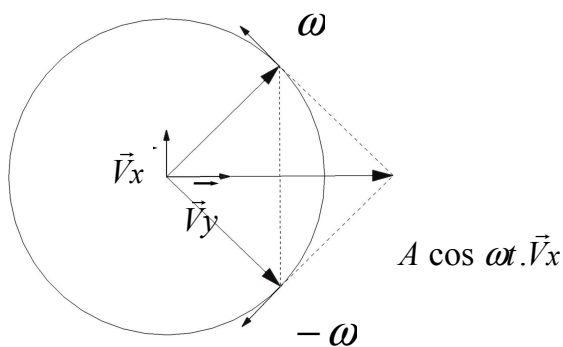


Figure 3-7 : Projection dans le plan P du champ d'excitation RF

Si $\omega = \omega_p$, la composante tournant dans la même direction que la précession sera en résonance. L'autre, tournant en sens contraire, aura une action négligeable.

Dans la sonde RMN utilisée dans le projet, une bobine contenant l'échantillon soumis au champ à mesurer est montée dans un circuit résonnant parallèle (cf. figure 3-8). L'échantillon est un matériau solide, contenant un grand nombre de protons ^1H , pour les sondes utilisées.

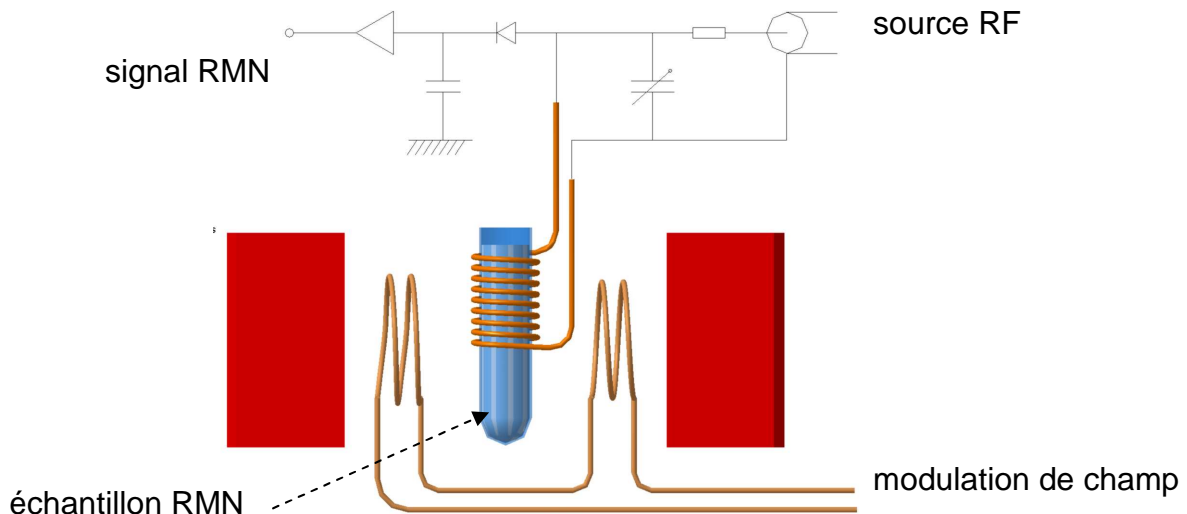


Figure 3-8

Ce circuit est excité en courant par une onde radiofréquence sinusoïdale très stable à travers une résistance R , dont la valeur comparée à l'impédance parallèle du circuit LC est grande. La résonance magnétique nucléaire est détectée par la variation brutale d'amortissement qu'elle induit dans la bobine.

On module le champ à mesurer par un champ alternatif additionnel colinéaire à \vec{B}_0 et variant à la fréquence $f_{\text{mod}} \approx$ quelques dizaines de Hz . Une boucle verrouillée en phase permet de mesurer la fréquence RF à la résonance, donc d'accéder à la valeur de B_0 .

Le champ de modulation est produit par une bobine plate placée dans la sonde RMN, il est créé par un courant de modulation triangulaire d'amplitude pouvant atteindre 100 à 1000 ppm de la valeur du champ statique B_0 .

Pour terminer ce paragraphe, signalons que cette démonstration a été menée en supposant le champ B_0 perpendiculaire au champ RF. Si ce n'est pas le cas, les composantes transverses de B_0 peuvent venir altérer le signal de résonance ou rendre toute mesure impossible.

Chapitre 4

Dans ce chapitre sont abordés la mise en place du projet de mesure par sonde RMN, sa conception, son développement et sa mise au point dans quelques cas particuliers, ce qui permet de bien souligner les difficultés rencontrées lors du développement du système.

4 - Système de mesures du champ magnétique par RMN

4.1 – Choix du système

Selon le cahier des charges qui résulte des contraintes exposées au chapitre 2, le choix s'est rapidement porté sur un teslamètre de la société METROLAB [10] le PT2025.

Cet appareil est une évolution de l'appareil SENTEC, développé au CERN, puis commercialisé par cette société suisse.

Le PT2025 était déjà utilisé au GANIL, pour les mesures magnétiques des électroaimants sur un banc test, avant leur installation sur les lignes de faisceau. Il assurait alors l'étalonnage des sondes de Hall avant cartographie des aimants sur le Banc Universel de Mesures Magnétiques (BUMM) et les mesures du champ magnétique au centre des dipôles afin d'établir les caractéristiques Champ/Courant : $B=f(I)$ des dipôles.

Le développement du système a été initialement mené autour de cette unité centrale, d'un multiplexeur et de quelques sondes.

Il s'agit du seul système présent sur le marché capable de multiplexer 64 sondes (8 x 8 voies). Dans sa version complète, il permet une mesure de 0.043 à 13.7 T, 8 sondes sont nécessaires pour couvrir cette plage. Le tableau ci-dessous donne la gamme de champ couverte par chacune des 5 sondes utilisées au GANIL, comprise entre 0.043 et 2.1 T.

Type de sonde	B minimum en T	B maximum en T
1	0.043	0.13
2	0.09	0.26
3	0.17	0.52
4	0.35	1.05
5	0.7	2.1

Tableau 4-1. : Gamme de champ associée à chaque sonde

La précision de la mesure, qui est meilleure que +/- 5 ppm, répond parfaitement aux besoins. De même, la remarquable insensibilité à la température, +/- 1 ppm entre 10°C et 40°C, permet de

s'affranchir d'une correction de température. La résolution de l'appareil est de 10^{-7} T (0.001 Gauss). Le système permet une recherche manuelle, automatique ou semi-automatique. Il est pilotable à distance par liaison RS232 ou IEEE 485 (GPIB). [11]

L'unité centrale, un multiplexeur, une sonde 1060 et une sonde miniature 1080 sont présentés (cf. figure 4-1, 2 et 3).

Par contre, comme nous l'avons vu précédemment, 5 sondes sont parfois nécessaires pour un seul objet à mesurer ce qui entraîne un encombrement mécanique et un coût plus important. Par ailleurs il reste à traiter les champs inférieurs à 0.043 T. Autre point sensible, le champ doit être suffisamment homogène pour que le phénomène de résonance soit détecté. Il en résulte un positionnement de la sonde délicat sur une installation existante.

Nous verrons plus loin que cet inconvénient est à l'origine de plusieurs développements particuliers.



Figure 4-1 : Teslamètre METROLAB Unité centrale PT2025

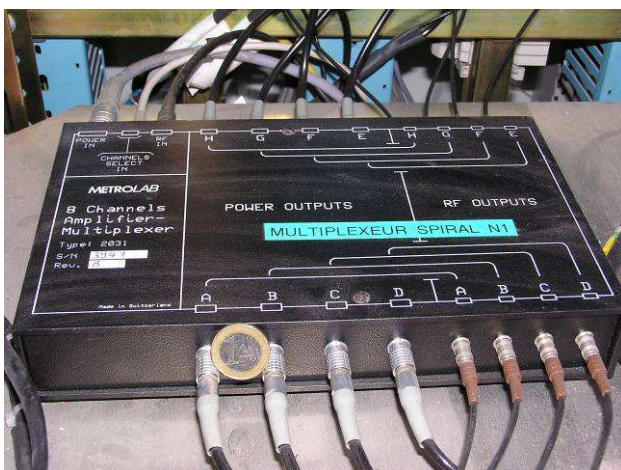


Figure 4-2: multiplexeur 2031



Figure 4-3 : sonde RMN 1060 et 1080 et Ampli 1030

Les caractéristiques de l'appareil sont données en annexe 1. Pour terminer ce paragraphe, signalons que la liaison IEEE a été choisie de préférence à la liaison RS232 pour des raisons d'homogénéité avec l'interfaçage d'instruments en place ou en projet.

La structure de base du système est présentée ci-dessous avec ses diverses possibilités d'interconnexion.

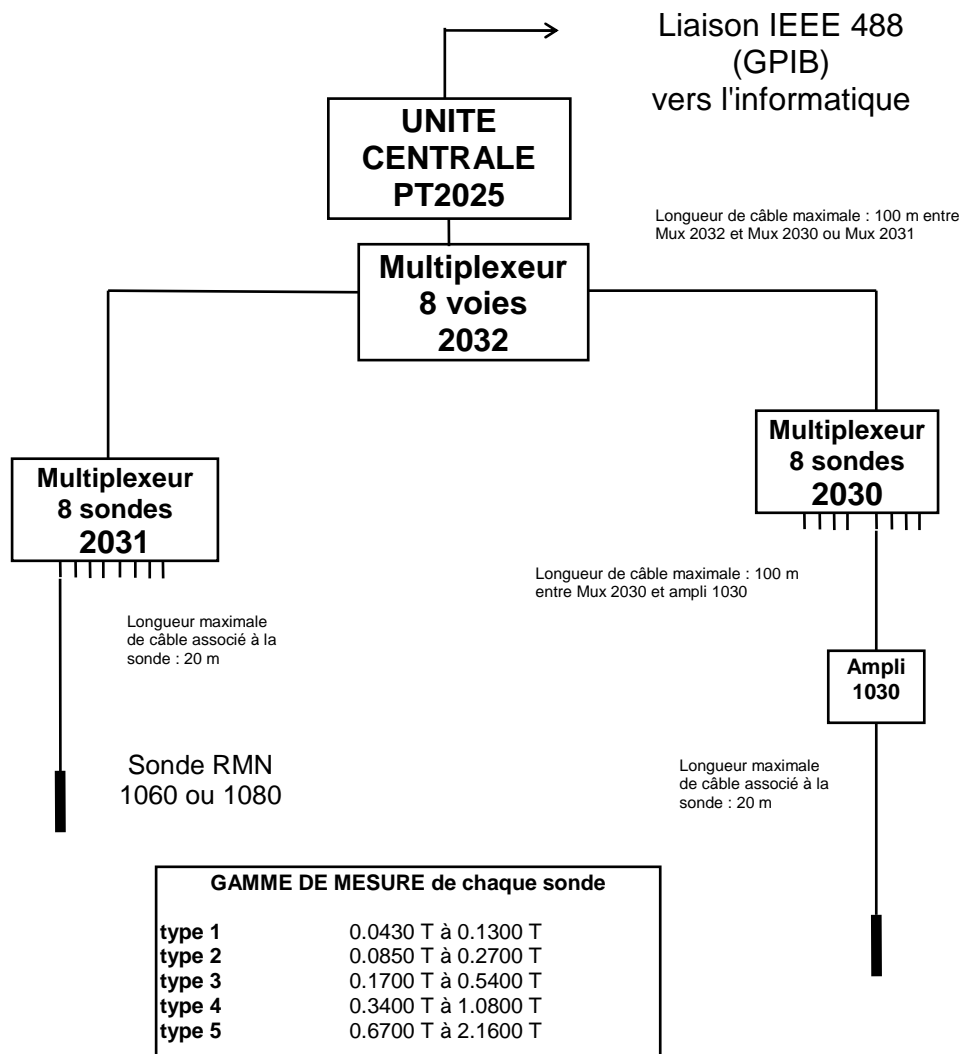


Figure 4-4 : Architecture de base

4.2 – Développement et mise en place sur l'accélérateur

Comme il a été dit précédemment, nous disposons d'une unité centrale PT2025 pour faire les premiers tests et valider notre choix. Dans une première phase, nous avons développé en laboratoire un système test comprenant : une unité centrale, un multiplexeur 2031, une sonde de type 2 positionnée dans un petit aimant permanent en C (0.18 T). (cf. figure 4-5)

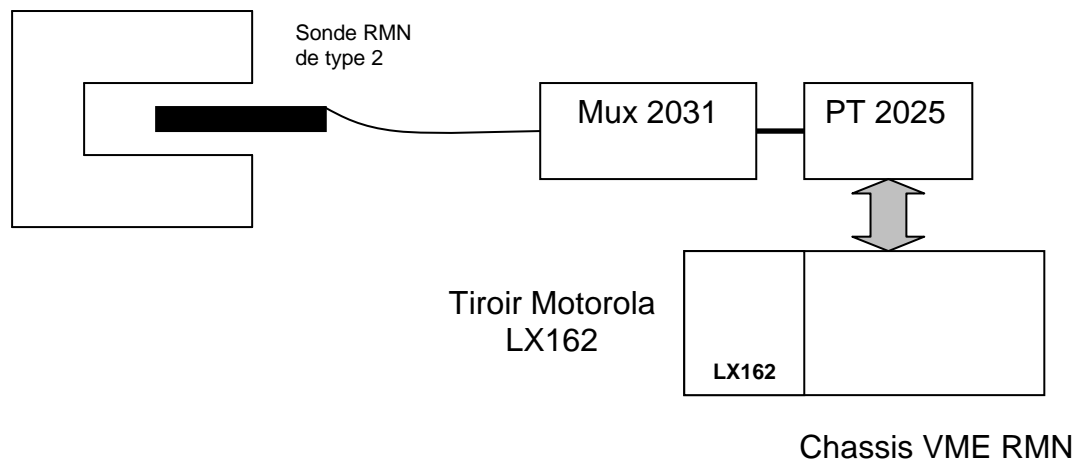


Figure 4-5 : Schéma de mise en place des premiers essais.

Une fois l'algorithme de mesure mis au point (cf. paragraphe 5-2), nous avons équipé un dipôle du spectromètre alpha (L3.G.D34) avec 3 sondes, afin de couvrir l'excursion en champ nécessaire (0.17 à 2.1 T). La sonde de l'ancien appareil a été laissée en place. Les deux systèmes étant en service, il a été facile de comparer leurs performances réciproques.

En particulier, nous avons pu remarquer que le système METROLAB perturbe le signal de résonance de l'ancien système mais non l'inverse.

Par ailleurs, le développement de cet ensemble en parallèle avec l'ancien a permis d'assurer la continuité du service et d'étaler dans le temps la mise en place complète du système.

Dans sa configuration finale, le système se compose d'une unité centrale PT2025 et d'un multiplexeur 2032 qui peut multiplexer 8 autres multiplexeurs. Cette électronique est installée dans une baie proche du système informatique de l'accélérateur. Des multiplexeurs de sondes 2031 et 2030 sont répartis dans les différentes casemates de la machine de manière à minimiser les

distances avec les points de mesures. L'emploi d'un multiplexeur 2031 nous impose une longueur maximale de câble de 100 mètres. Pour des distances supérieures, jusqu'à 200 m, il faut mettre en œuvre un multiplexeur 2030 associé à des préamplificateurs 1030. Voir la figure 4-6 ci-dessous

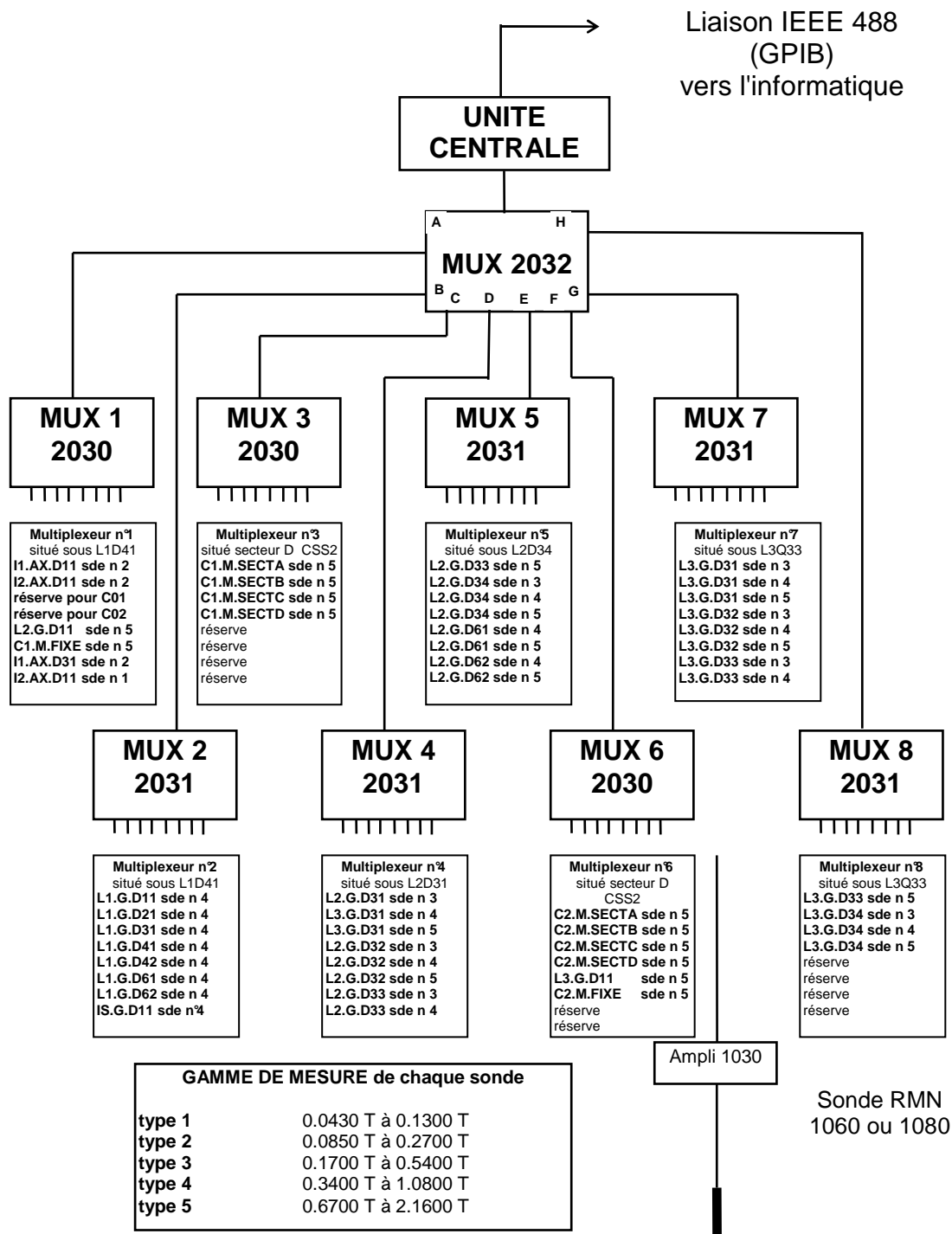


Figure 4-6 : Architecture du système

Chaque aimant (dipôle ou secteur de CSS) à mesurer est équipé de sondes RMN. Comme il est dit précédemment, plusieurs sondes sont parfois nécessaires pour couvrir la gamme de champ de l'objet.

Dans le tableau ci-dessous on peut voir sur quels multiplexeurs sont connectées les sondes des aimants. (les noms opérationnels des objets sont notés en rouge).

voie des multiplexeurs	voie A	voie B	voie C	voie D	Voie E	voie F	voie G	voie H
multiplexeur 1 2030	I1.AX.D11 1060-2	I2.AX.D11 1060-2	réserve C01	réserve C02	L2.G.D11 1060-5	C1.M.FIXE 1060-5	I1.AX.D31 1060-2	I2.AX.D11 1060-1
multiplexeur 2 2031	L1.G.D11 1060-4	L1.G.D21 1060-4	L1.G.D31 1060-4	L1.G.D41 1060-4	L1.G.D42 1060-4	L1.G.D61 1060-4	L1.G.D62 1060-4	IS.G.D11 1060-4
multiplexeur 3 2030	C1.M.SECTA 1060-5	C1.M.SECTB 1060-5	C1.M.SECTB 1060-5	C1.M.SECTD 1060-5	réserve	réserve	réserve	réserve
multiplexeur 4 2031	L2.G.D31 1060-3	L2.G.D31 1060-4	L2.G.D31 1060-5	L2.G.D32 1060-3	L2.G.D32 1060-4	L2.G.D32 1060-5	L2.G.D33 1060-3	L2.G.D33 1060-4
multiplexeur 5 2031	L2.G.D33 1060-5	L2.G.D34 1060-3	L2.G.D34 1060-4	L2.G.D34 1060-5	L2.G.D61 1060-4	L2.G.D61 1060-5	L2.G.D62 1060-4	L2.G.D62 1060-5
multiplexeur 6 2030	C2.M.SECTA 1060-5	C2.M.SECTB 1060-5	C2.M.SECTC 1060-5	C2.M.SECTD 1060-5	L3.G.D11 1060-5	C2.M.FIXE 1060-5	réserve	réserve
multiplexeur 7 2031	L3.G.D31 1060-3	L3.G.D31 1060-4	L3.G.D31 1060-5	L3.G.D32 1060-3	L3.G.D32 1060-4	L3.G.D32 1060-5	L3.G.D33 1060-3	L3.G.D33 1060-4
multiplexeur 8 2031	L3.G.D33 1060-5	L3.G.D34 1060-3	L3.G.D34 1060-4	L3.G.D34 1060-5	réserve	réserve	réserve	réserve

Tableau 4-2 : Répartition des sondes sur les multiplexeurs.

A chaque nom opérationnel d'un objet est associé un nombre de sondes, la voie du 2032 à multiplexer, la voie du 2030 ou 2031 à multiplexer, le ou les types de sondes connectées ainsi que l'extension en champ de chaque sonde. L'ensemble de ces informations est stocké en base de données. Quelques exemples d'objets et leurs informations associées sont présentés dans le tableau suivant.

Nom opérationnel	Nombre de sondes	Voie du 2032	Voie du 2030 ou du 2031	Type de sonde	B min en Gauss	B max en Gauss
I1.AX.D11.RMN	1	A	A	Type 2	850	2700
I1.AX.D31.RMN	1	A	G	Type 2	850	2700
C1.M.FIXE.RMN	1	A	F	Type 5	7500	18000
L2.G.D31.RMN	3	D	A	Type 3	1700	4000
			B	Type 4	4000	9000
			C	Type 5	9000	21600
L3.G.D31.RMN	3	G	A	Type 3	1700	4000
			B	Type 4	4000	9000
			C	Type 5	9000	21600

Tableau 4-3 : Types d'informations stockées en base de données.

4.3 – Développement et mise en place de 2 autres systèmes

Le développement et le début de la mise en place de ce système donnant toute satisfaction, il a été proposé d'en équiper les aimants de SPIRAL et des Aires Expérimentales. Deux autres unités ont été installées. Elles n'utilisent pas au maximum les possibilités de commutation du PT2025, puisque seulement 12 sondes sont raccordées sur l'unité SPIRAL et 32 sondes sur celle des Aires Expérimentales. Des longueurs de câbles supérieures à 200m n'ont pas permis de regrouper ces deux unités.

L'architecture du système des Aires Expérimentales est présentée ci-dessous figure 4-7.

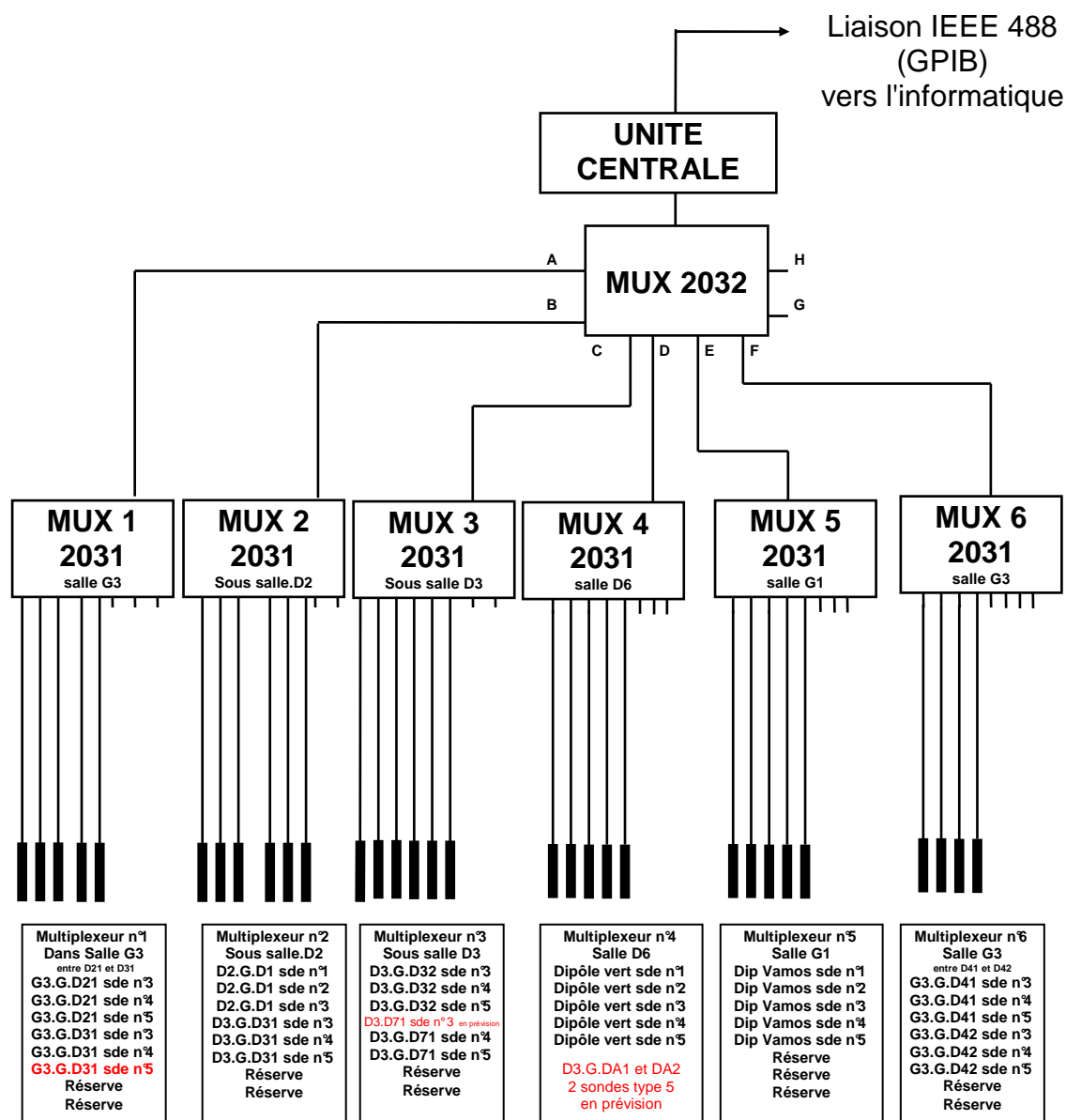


Figure 4-7 : Système des Aires Expérimentales.

L'architecture du système de SPIRAL est très peu ramifiée (cf. figure 4-8). Elle laisse ouvertes des possibilités de regroupement avec des mesures sur d'autres dipôles, par exemple lors de l'extension au projet SPIRAL 2.

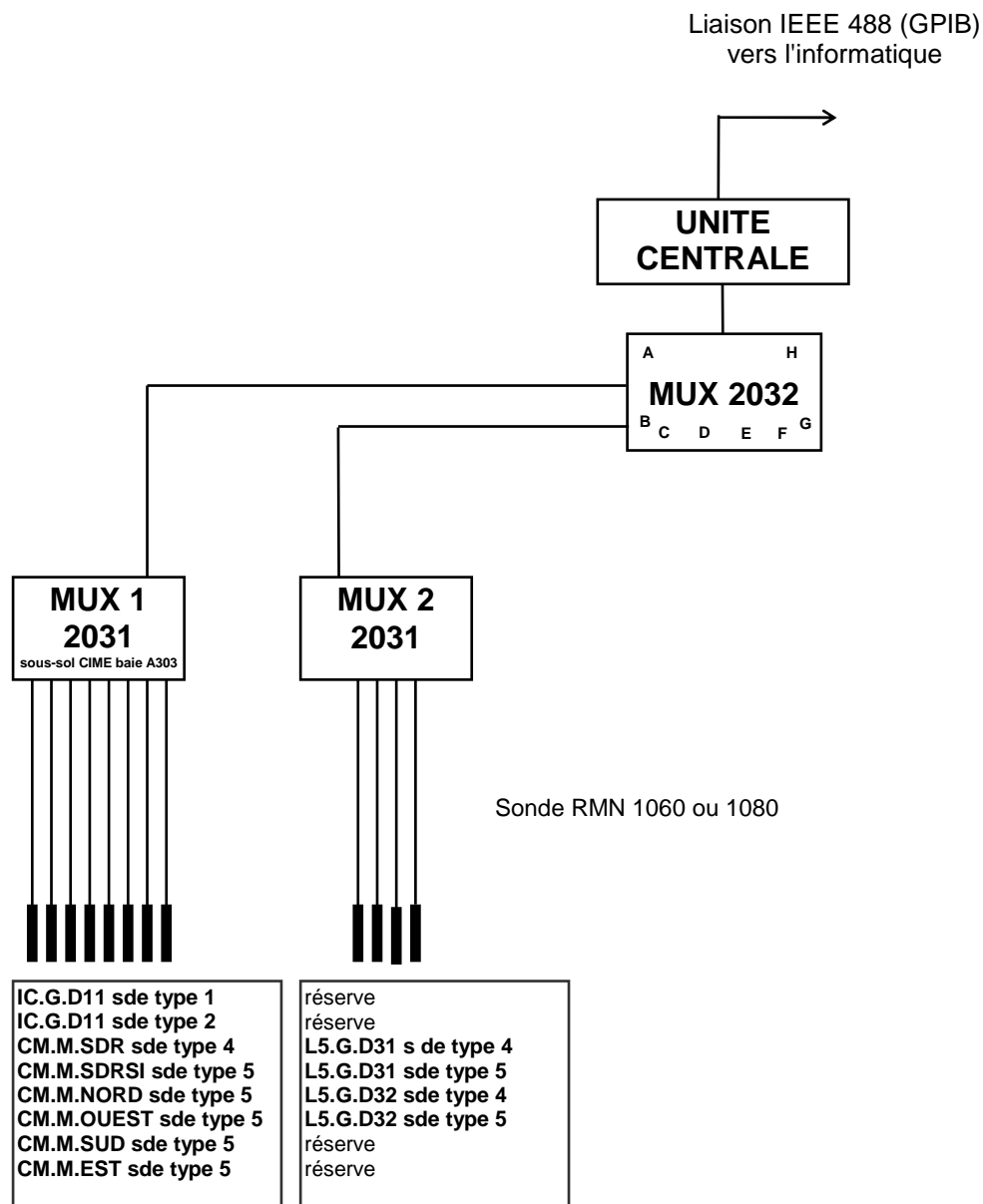


Figure 4-8 : Système SPIRAL

4.4 – Développement d'un logiciel complet de mesure.

Le système développé permet de mesurer et de surveiller le champ. Il permet de piloter les alimentations de courant et ainsi régler le champ magnétique des dipôles et des secteurs des CSS.

4.4.1 – Commande-contrôle du PT2025.

L'interfaçage avec le commande contrôle de la machine se fait via un châssis VME [12] où le processus RMN est chargé et un tiroir Motorola LX162 où le protocole GPIB est déjà intégré.

La liaison GPIB est une liaison parallèle développée surtout dans le monde de l'instrumentation en laboratoire. Chaque appareil relié au bus a une adresse. Pour dialoguer avec chaque appareil on doit adresser l'appareil avant toute commande ou lecture. Les commandes envoyées et les lectures reçues sont des caractères ASCII.

La plage de recherche s'étend sur $\pm 5\%$ autour d'une valeur centrale qui est commandée par un DAC 12 bits.

Les commandes effectivement utilisées par ce protocole pour piloter le METROLAB PT2025 sont les suivantes : voir tableau 4-4.

Caractères ASCII des commandes utilisées	Description des fonctions réalisées
An ex : A1	Recherche semi-automatique $\pm 5\%$ autour de la valeur du DAC
Cnnnn ex : C1286	Chargement du DAC 12bits
Dn ex : D1	Affichage de la valeur en Tesla (1) ou en MHz(0)
Fn ex : F1	Sens de modulation de champ (1 : + , 0 : -)
In ex : IA	Choix de la voie du multiplexeur 2032 (choix du multiplexeur)
Pc ex : PB	Choix de la voie du multiplexeur 2030 ou 2031 (choix de la sonde)
Sn ex : S1	Sélection d'un des 4 registres d'état à lire

Tableau 4-4 : Caractères ASCII des commandes utilisées.

La valeur renvoyée par le PT2025 après une lecture suit le format : **vdd.ddddddddT**

Dans cette expression :

T : rappelle que la valeur est exprimée en T.

dd.dddddd : sont les caractères ASCII de la valeur du champ.

v : indique la validation de la mesure qui peut prendre les valeurs suivantes :

L : mesure valide signal verrouillé. (Locked)

N : pas de signal de résonance présent.

S : signal de résonance présent mais la mesure n'est pas encore valide.

W : mesure sans signification.

Exemple de codes ASCII renvoyés par le PT2025 : **L01.3423454T**

soit : 1.3423454 T (13 423.454 Gauss)

4.4.2 - Algorithme de mesure.

Lorsque l'on veut mesurer le champ d'un objet (dipôle ou CSS), plusieurs actions sont réalisées, certaines au niveau de l'application, d'autres au niveau du processus et d'autres au niveau du PT 2025. Le schéma ci-après, figure 4-9, présente l'architecture de l'informatique utilisée par le système de mesure et la figure 4-10 donne l'architecture de l'application Mesure RMN.

Afin de simplifier tous les organigrammes présentés par la suite, nous n'avons pas intégré dans ces représentations la gestion des erreurs.

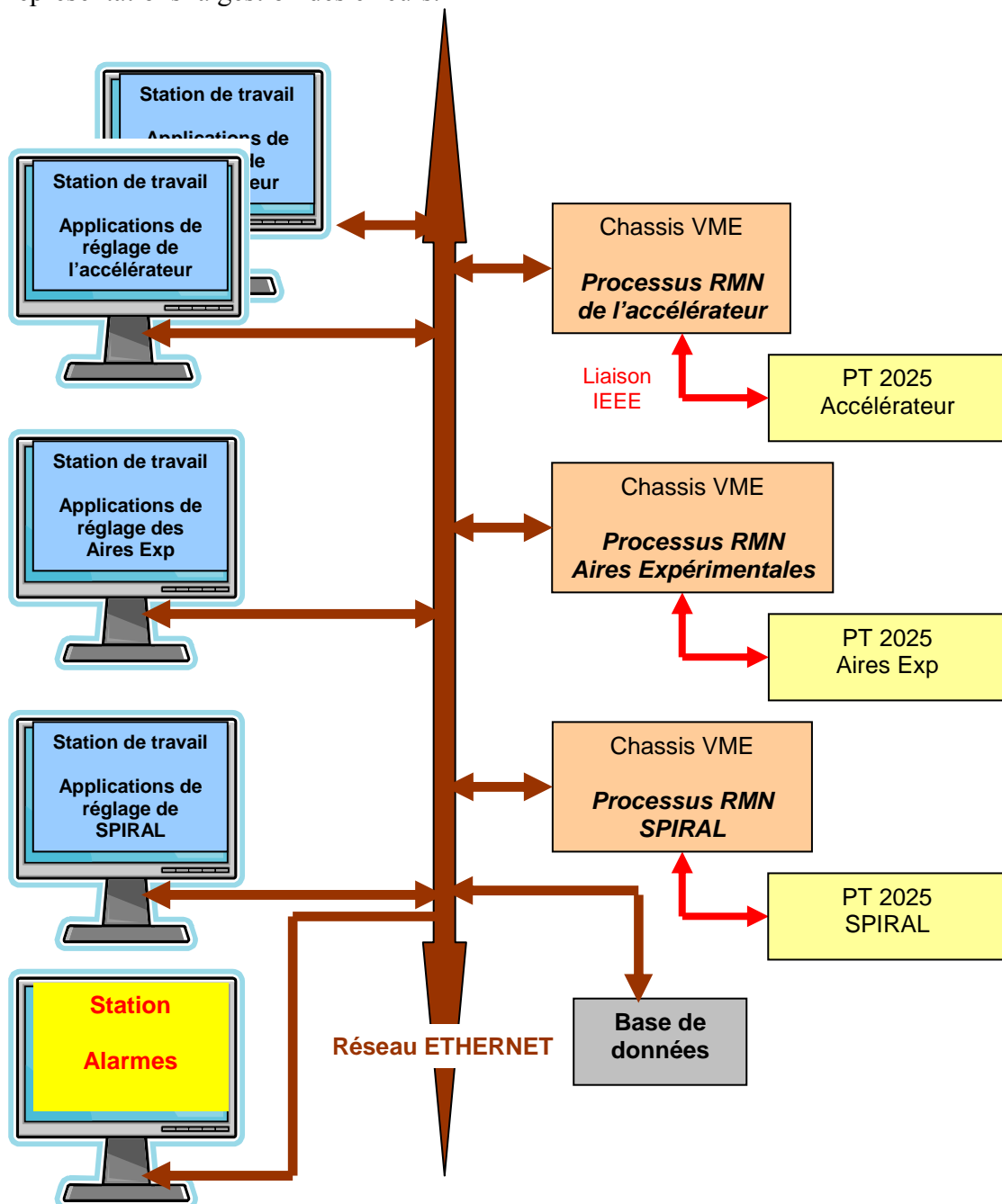


Figure 4-9 : Architecture matérielle.

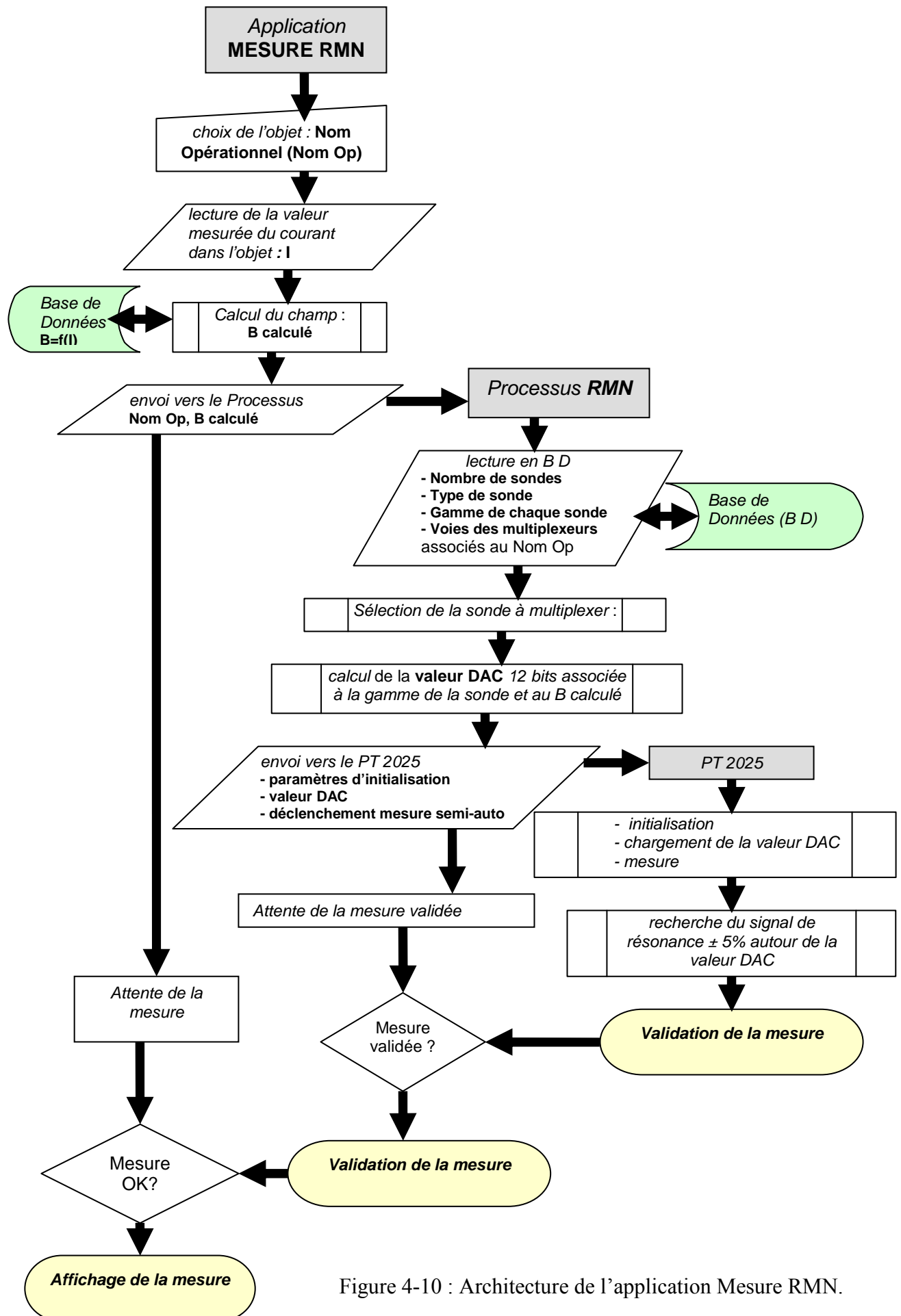


Figure 4-10 : Architecture de l'application Mesure RMN.

Il est à signaler, par ailleurs, que la structure logicielle a été conçue de façon universelle : toute modification matérielle ne nécessite alors que la reprise de la base de données.

Signalons que la conception des programmes a suivi les prescriptions d'une gestion des processus en temps réel, afin d'éviter les problèmes de réentrance : chaque mesure demandée ne peut s'effectuer que lorsque la précédente a envoyé son résultat.

En fin d'application la mesure est affichée sur l'écran d'une des stations de réglage où l'application Mesure RMN a été chargée (cf. figure 4-11).

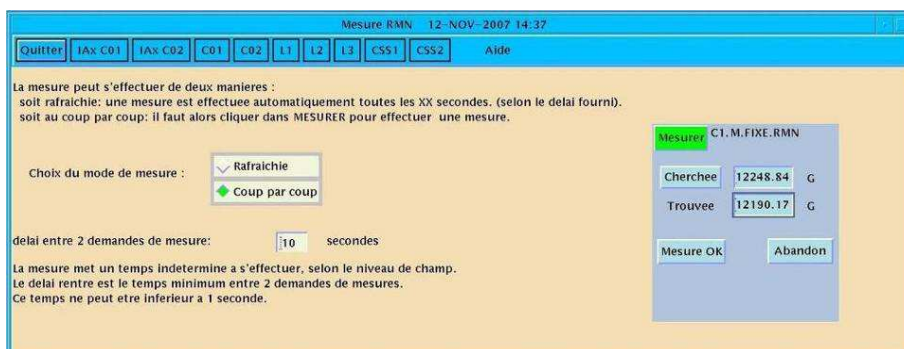


Figure 4-11 : Ecran de l'application Mesure RMN.

Cette architecture logicielle a été mise en œuvre dans diverses applications informatiques, nous en présentons quelques unes dans les paragraphes suivants.

4.4.3 - Application dipôles.

L'application permet de régler le champ magnétique d'un dipôle en commandant son courant. Elle calcule, d'après la valeur du champ visée, le courant nécessaire tel qu'il est stocké en base de données.

Cette application fait appel au processus de cyclage qui envoie à l'alimentation le courant maximum possible afin de saturer le circuit magnétique, puis fait décrire un cycle d'hystérésis autour de la valeur visée. Ce processus est utilisé aussi bien pour les dipôles que pour les deux CSS (cf. figure 4-12).

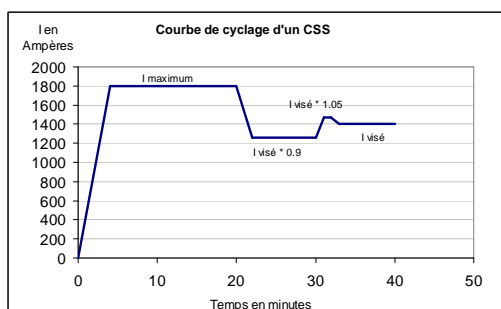


Figure 4-12 : Chronogramme du cyclage des CSS

L'organigramme de l'application Dipôles est présenté ci-dessous :

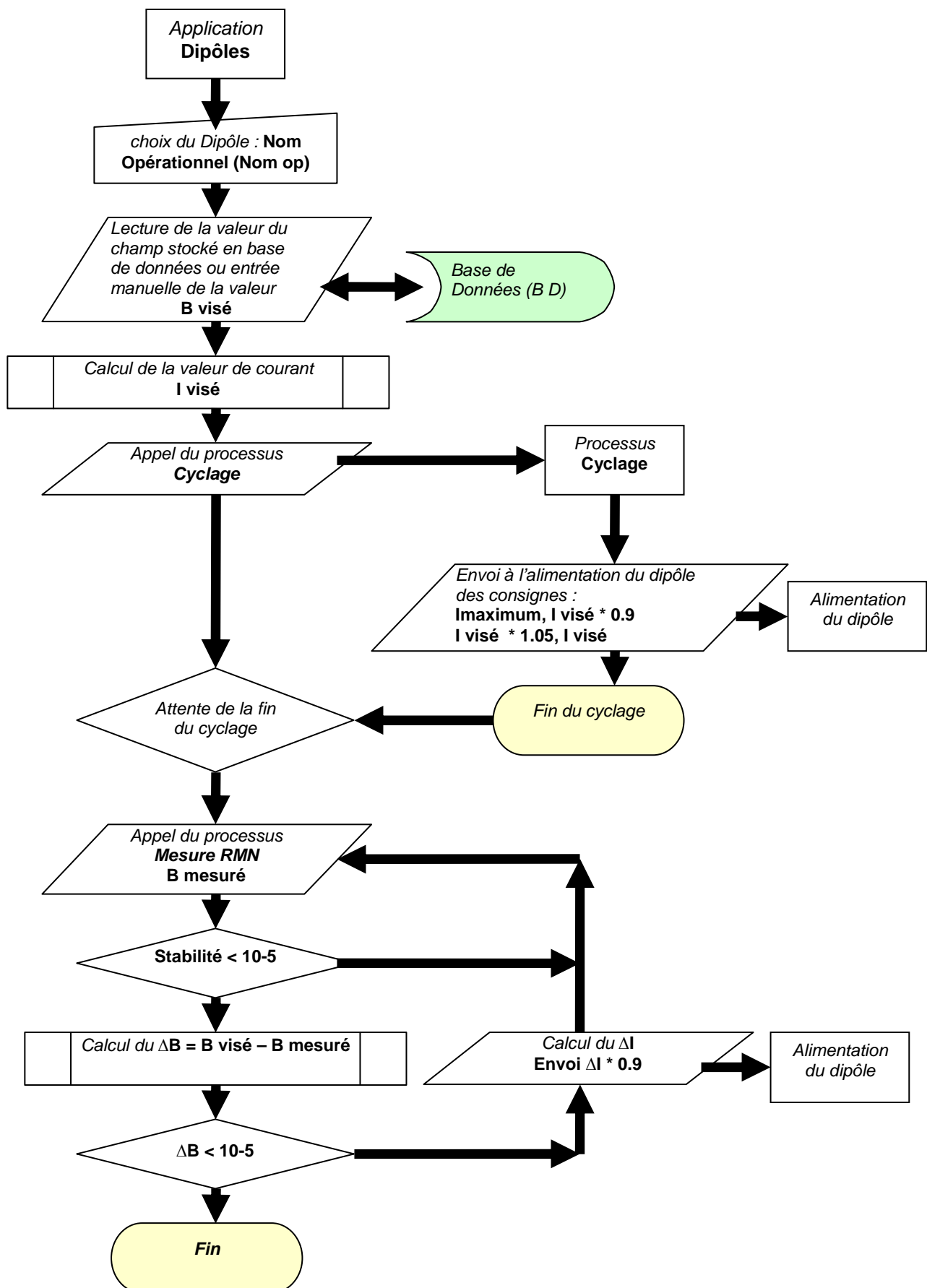


Figure 4-13 : Organigramme de l'application Dipôles.

Après chaque envoi de correction de courant, la mesure de champ est faite plusieurs fois pour prendre en compte la dérive magnétique. Le champ est considéré stable si le $\Delta B/B$ en une minute est inférieur à 10^{-5} . Les corrections de courant sont minorées afin de converger asymptotiquement vers la valeur visée. Le temps de stabilisation du champ magnétique a été ainsi réduit, surtout sur les gros aimants. Malgré les précautions utilisées, concernant en particulier la saturation du circuit magnétique, le champ du CSS dérive, après un démarrage, de quelques 10^{-6} pendant encore 48 heures.

Une visualisation de l'écran de l'application Dipôles est présentée ci-dessous, où le champ de quatre dipôles de la ligne L2 est en cours de réglage.



Figure 4-14 : Ecran de l'application Dipôles.

4.4.4 - Application équilibrage

La loi de champ isochrone dans les 4 secteurs de CSS1 et de CSS2 impose 4 valeurs d'équilibrage de champ entre secteurs à un même rayon. Ce rayon a été choisi dans une zone de champ suffisamment homogène. Pour réaliser cette mesure, une sonde RMN a été mise en place dans la direction radiale de chaque secteur. Une mécanique appropriée permet de positionner automatiquement la sonde au rayon d'équilibrage sur l'axe secteur et dans le plan médian de l'entrefer de l'aimant. (cf. figure 4-15)

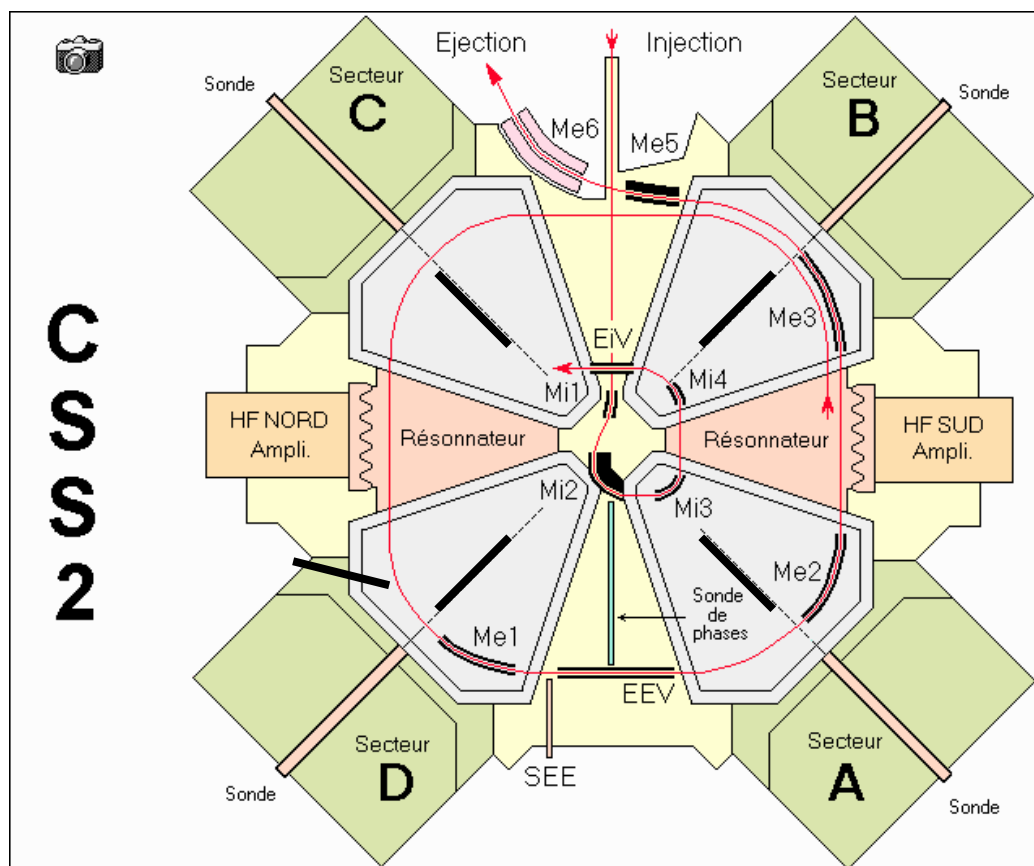


Figure 4-15: schéma du CSS2 avec ses 4 sondes radiales et en trait noir les 4 sondes RMN et une sonde fixe dans le secteur D (décrite paragraphe 4-5-1)

L'application équilibrage permet de régler le champ de chaque secteur en agissant sur :

- le courant I_{Bp} fourni par une première source qui alimente en série les bobines des 4 secteurs.

- les quatre courants i_{AuxA} , i_{AuxB} , i_{AuxC} , i_{AuxD} fournis par des sources auxiliaires, qui corrigent individuellement les champs fournis par les bobines principales des secteurs A, B, C et D. (cf. figure 4-16)

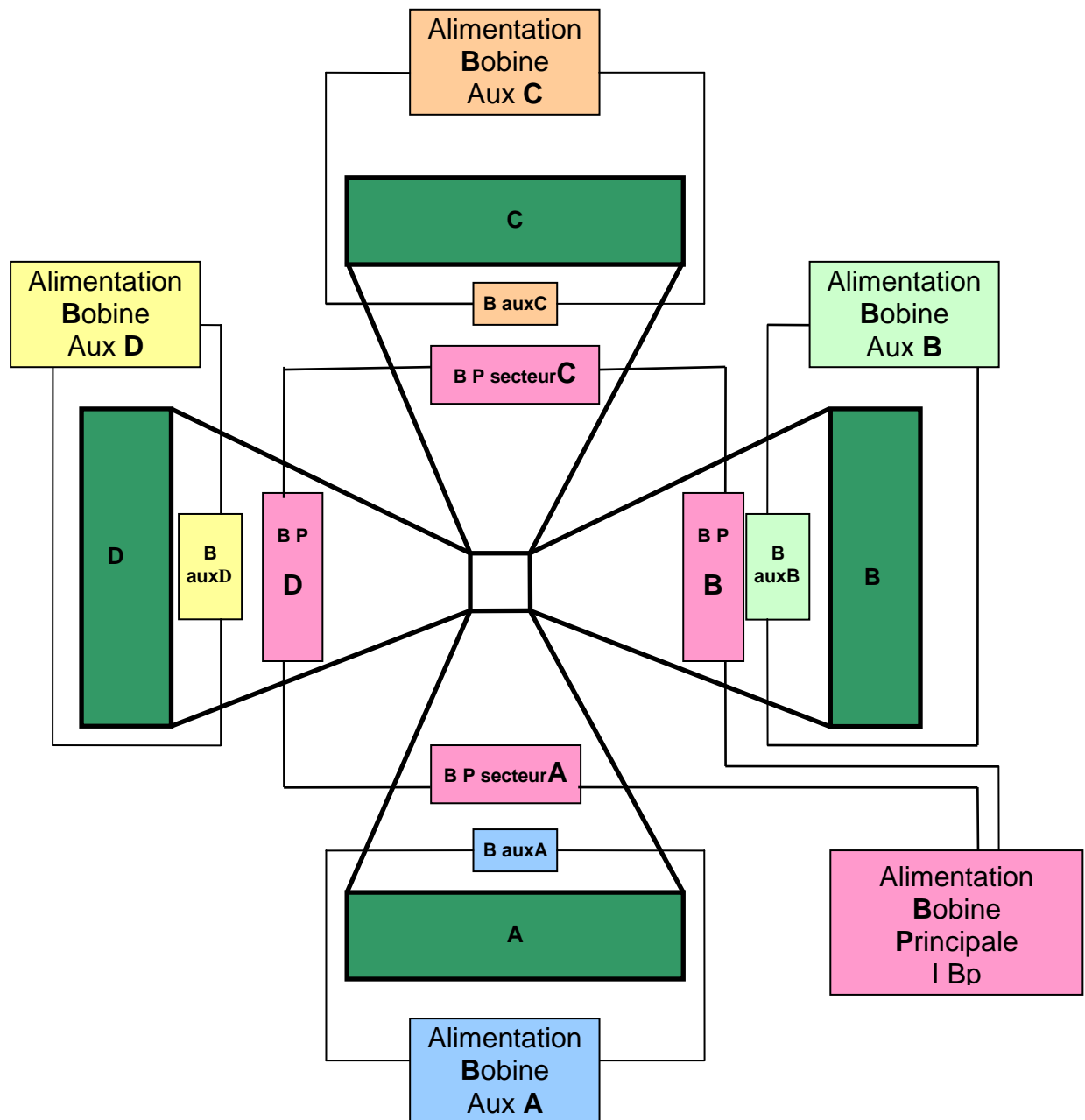


Figure 4-16 : schéma fonctionnel des bobines principales et auxiliaires

L'organigramme fonctionnel de l'application d'équilibrage est présenté ci-dessous.

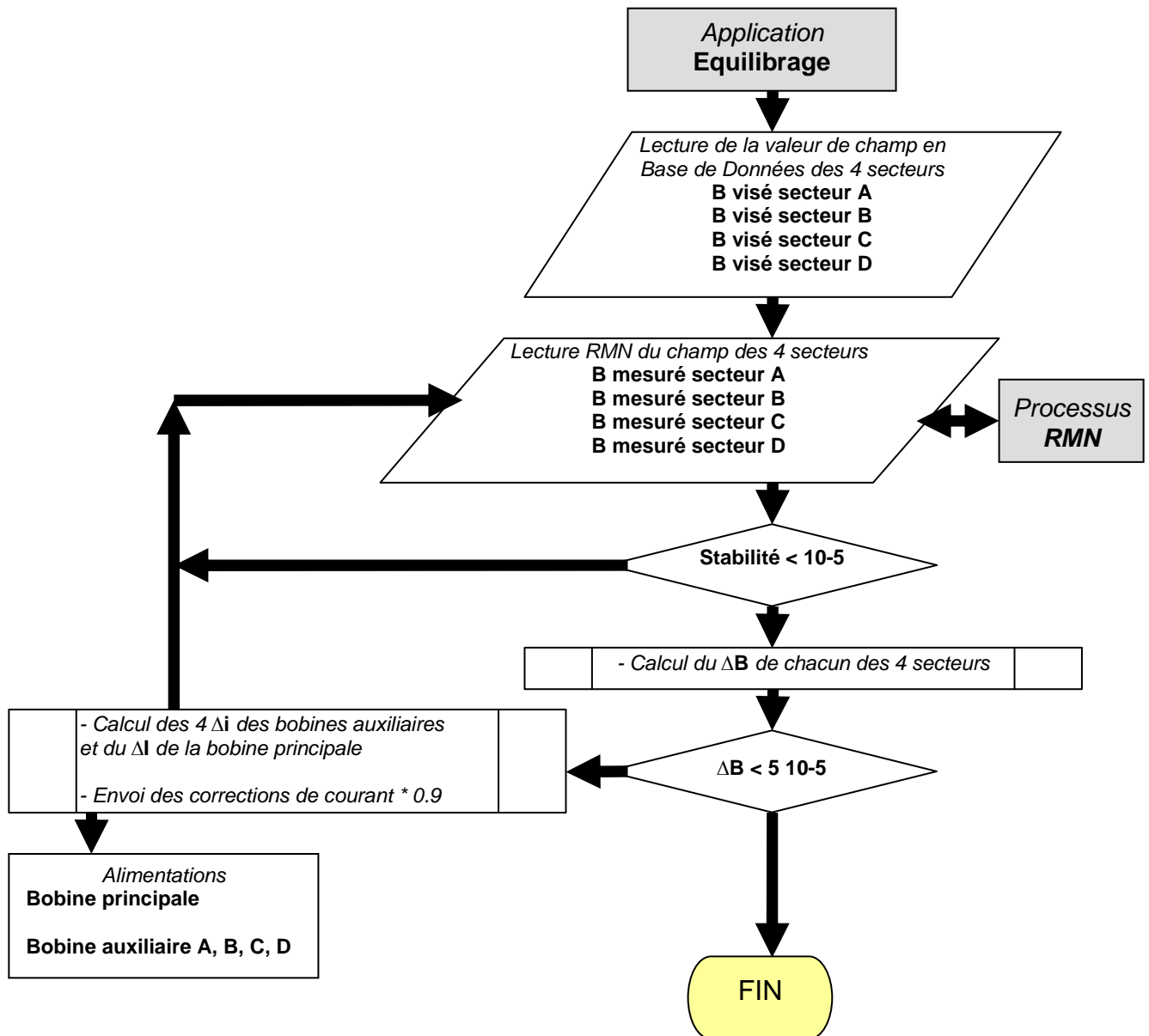


Figure 4-17 : Organigramme de l'application Equilibrage.

Les corrections de courant lors de la première itération sont telles que le courant est maximal dans l'alimentation principale et minimal dans les alimentations auxiliaires. Elles tiennent compte aussi de l'influence mutuelle de chaque secteur sur ses deux secteurs adjacents et sur le secteur opposé. Les coefficients de corrections nécessités par ces mutuelles inductances ont été prédéterminés lors des campagnes de mesures magnétiques effectuées à la construction de l'accélérateur.

Comme il est décrit dans le paragraphe 4.4.3, l'algorithme prend en compte la dérive du champ.

L'exemple de la saisie d'écran de l'application d'équilibrage (cf. figure 4-18) montre qu'après deux itérations la dispersion du champ entre les secteurs est inférieure à $5 \cdot 10^{-5}$. Dans ce cas présenté, une augmentation du champ de $0.4 \cdot 10^{-4}$ T obtenue par une légère correction de Ibp suffit pour atteindre le champ visé.

Equilibrage du CSS							
Serie	Secteur	F voulu G	F mesurée G	Delta RMH G	I lus A	I calculés A	Delta I A
1	A	12257.6	12261.4	3.81	-5.70	-5.74	-0.04
13:42:	B	12264.5	12267.8	3.36	-30.25	-30.16	0.10
13:47:	C	12255.2	12259.5	4.26	-13.18	-13.36	-0.18
	D	12250.2	12254.1	3.86	-22.01	-22.07	-0.06
	CENTRAL	12256.9			1070.16	1069.80	-0.36
2	A	12257.6	12258.1	0.55	-5.74	-5.77	-0.03
13:47:	B	12264.5	12264.8	0.36	-30.16	-30.13	0.03
13:51:	C	12255.2	12255.7	0.45	-13.36	-13.36	-0.00
	D	12250.2	12250.6	0.43	-22.07	-22.07	0.00
	CENTRAL	12256.9			1069.80	1069.76	-0.04
3	A	12257.6	12257.1	-0.47	-5.77		
13:51:	B	12264.5	12264.1	-0.40	-30.13		
	C	12255.2	12254.8	-0.42	-13.36		
	D	12250.2	Mesure		-22.07		
	CENTRAL	12256.9			1069.76		

Figure 4-18 : Ecran de l'application Equilibrage.

4.4.5 - Application Surveillance

Une fois les éléments réglés, la mesure RMN du champ des dipôles et des CSS permet leur surveillance. Toutes les trois minutes une mesure est effectuée et comparée avec la valeur initiale (valeur de surveillance). Si la dérive dépasse un seuil, préalablement défini, alors le système génère une alarme de champ (cf. figure 4-20). Une correction de courant de l'alimentation est proposée à l'opérateur.

Toutes les sondes RMN des dipôles peuvent être utilisées pour cette fonction de surveillance. Par contre, les sondes RMN disposées radialement dans les CSS ne peuvent servir qu'à l'équilibrage des secteurs car elles seraient un obstacle pour le faisceau si elles étaient maintenues en place, comme on a pu le constater précédemment, figure 4-15. Une sonde fixe dédiée à la surveillance a été installée à l'arrière du secteur D (CSS1 et CSS2), dans un doigt de gant en aluminium à quelques centimètres du dernier tour de faisceau. (voir paragraphe 4.5.1 : étude du positionnement de cette sonde)

Le tableau des seuils de surveillance pour quelques objets est présenté ci-dessous.

Nom de l'objet surveillé	L1.D41	L1.D61			L3.D31	
	L1.D42	L1.D62			L3.D32	
	L2.D31	L2.D11	CSS1	CSS2	L3.D33	IC.D31
	L2.D32	L1.D61	Fixe	Fixe	L3.D34	Surveillé
	L2.D33	L1.D62			Spectromètre α	par sonde de
	L2.D34	L3.D11				Hall
$\Delta B/B$	$0.5 \cdot 10^{-4}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	$0.05 \cdot 10^{-4}$	$0.03 \cdot 10^{-4}$ (2)	$0.5 \cdot 10^{-4}$ (1)	$5 \cdot 10^{-4}$

Tableau 4-4 : Quelques valeurs de seuil de surveillance

Ces seuils sont calculés pour chaque aimant, en fonction des tolérances admises sur la position du faisceau, le calcul est présenté ci-dessous dans les cas (1) et (2).

(1) – Cas des dipôles du spectromètre alpha, on peut tolérer un déplacement de la position du faisceau jusqu'à 0.35 mm. On sait qu'une variation du champ de 10^{-3} provoque un déplacement de 7 mm du faisceau, le seuil est donc de $0.5 \cdot 10^{-4}$ (0.5 Gauss sur 10000 Gauss).

(2) - Dans le cyclotron la variation de phase centrale du faisceau en fonction de la variation relative de champ est donnée par la formule suivante :

$$d\phi \text{ (degrés)} = 360 * N * h * dB/B \quad \text{Equation 4-1}$$

N est le nombre de tours dans le cyclotron

h l'harmonique de fonctionnement (le rapport entre la fréquence de l'onde accélératrice et la fréquence de révolution de l'ion).

Une tolérance de variation de phase centrale de 1° étant admise.

Pour le cyclotron CSS2 : $N=500$, $h=2$.

$$dB/B = 1/360 * 500 * 2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ soit } 0.03 \text{ Gauss sur } 10000 \text{ Gauss.}$$

L'écran de l'application surveillance du champ magnétique et celui des alarmes sont présentés ci-dessous.

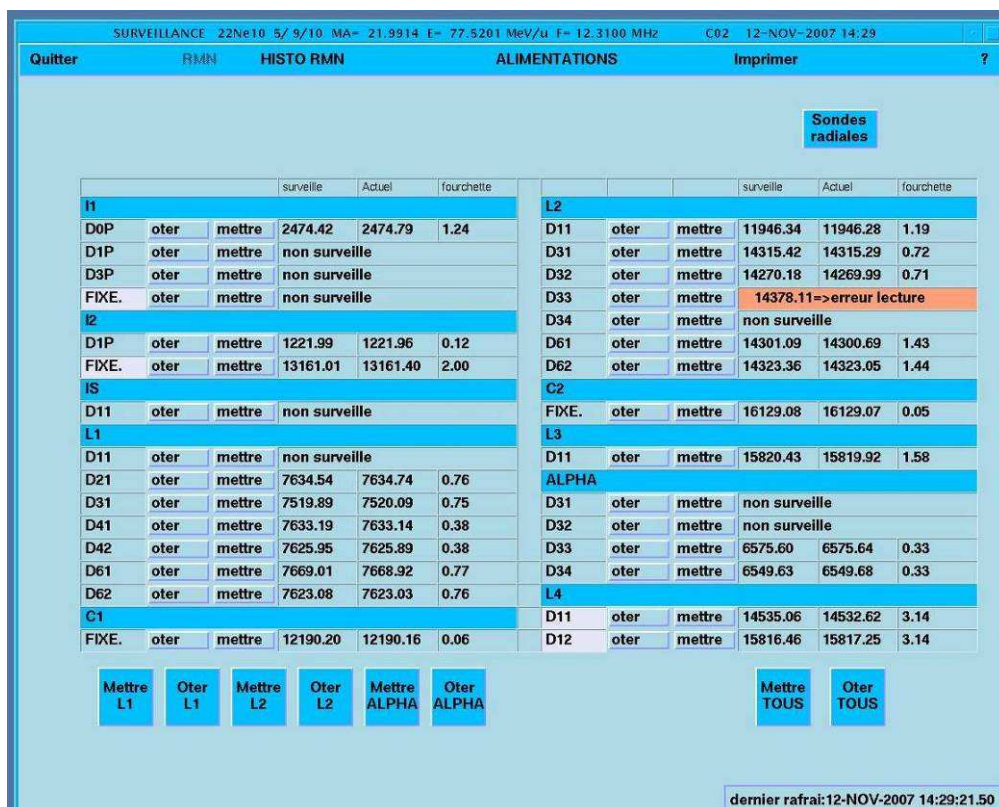


Figure 4-19 : Ecran de l'application surveillance.

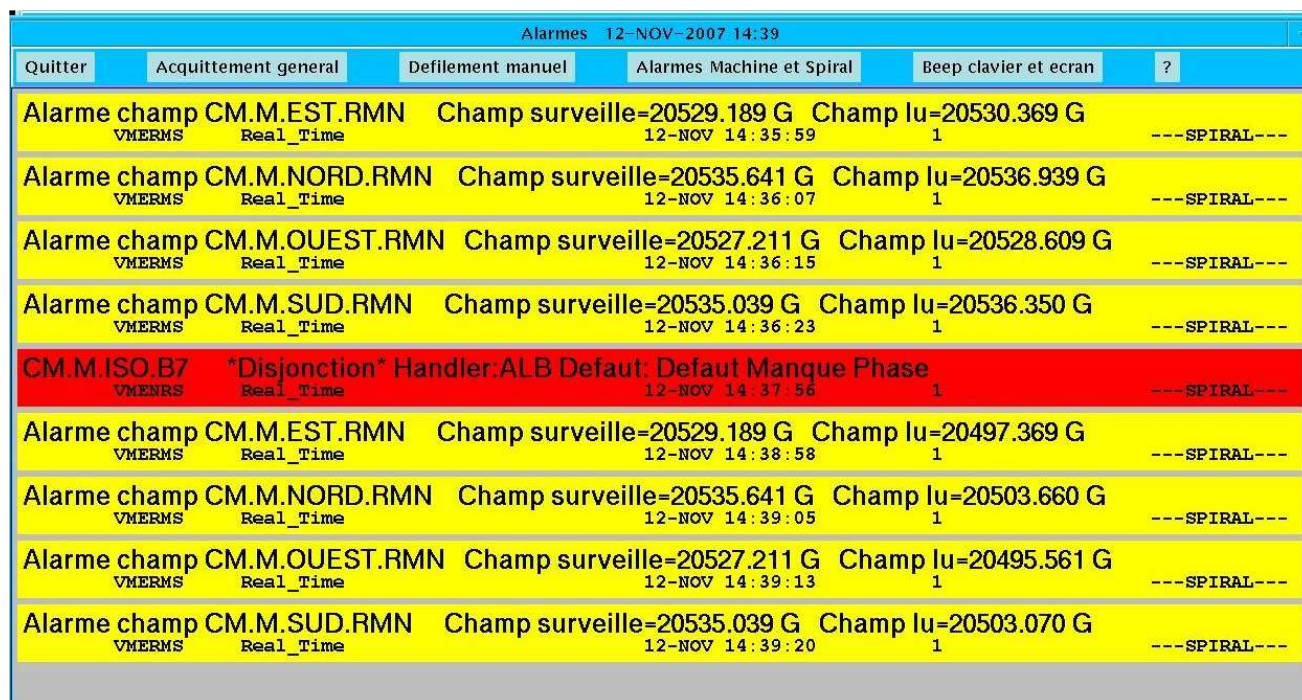


Figure 4-20 : Ecran des alarmes de l'application surveillance.

Avant de présenter quelques exemples de résultats obtenus, signalons que la surveillance automatique est interrompue dans le cas d'une demande de degré de priorité plus élevée. Si c'est le cas elle ne reprend qu'après acquittement par les système de ses tâches prioritaires.

Les valeurs de champ mesurées dans le cadre de cette surveillance sont enregistrées et archivées. Il est possible, comme on le voit sur la figure 4-21, de rechercher l'historique des mesures de champ jusqu'à une durée de 1 an et ainsi analyser certains réglages de l'accélérateur. L'enregistrement figure 4-21 représente l'évolution du champ du dipôle L3.D31 sur une durée de 7 jours. Dans ce cas, les excursions extrêmes restent dans les limites de la surveillance (± 0.7 Gauss). Malgré les variations dues au cycle jour/nuit, dont les explications sont données plus loin dans le document, aucune correction n'a été nécessaire.

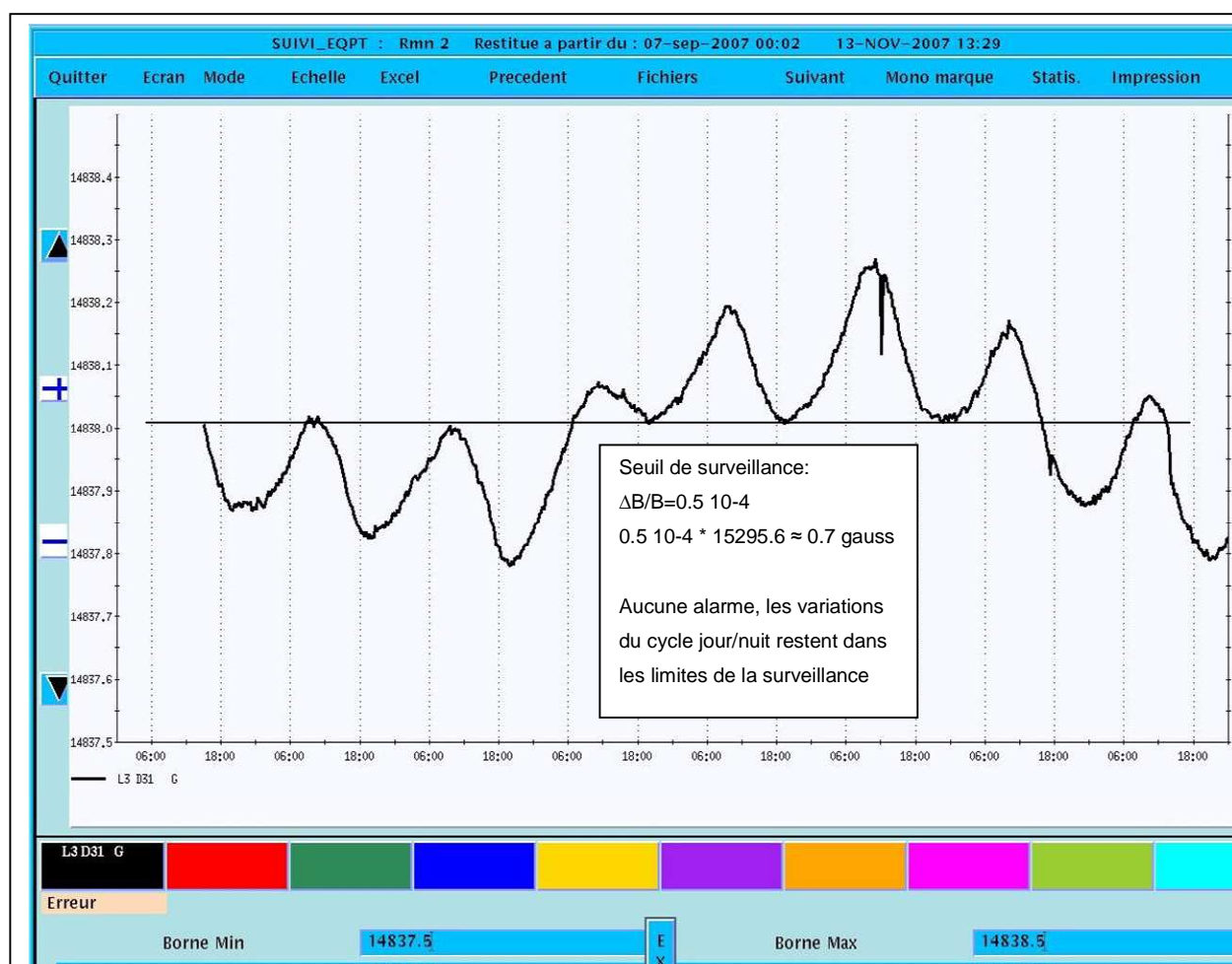


Figure 4-21 : Ecran de suivi du champ du dipôle L3D31 .

Sur l'enregistrement suivant (cf. figure 4-22) les variations de ce même dipôle sur une durée de 6 jours, sont présentées. Cette figure montre l'intérêt de la surveillance dans la conduite du faisceau et l'aide à la décision apportée à l'opérateur.

- Aucune alarme n'a été générée puisque les variations restent inférieures au seuil de surveillance.
- L'outil a permis de diagnostiquer une dérive et l'opérateur a pu effectuer en ligne une correction adéquate.

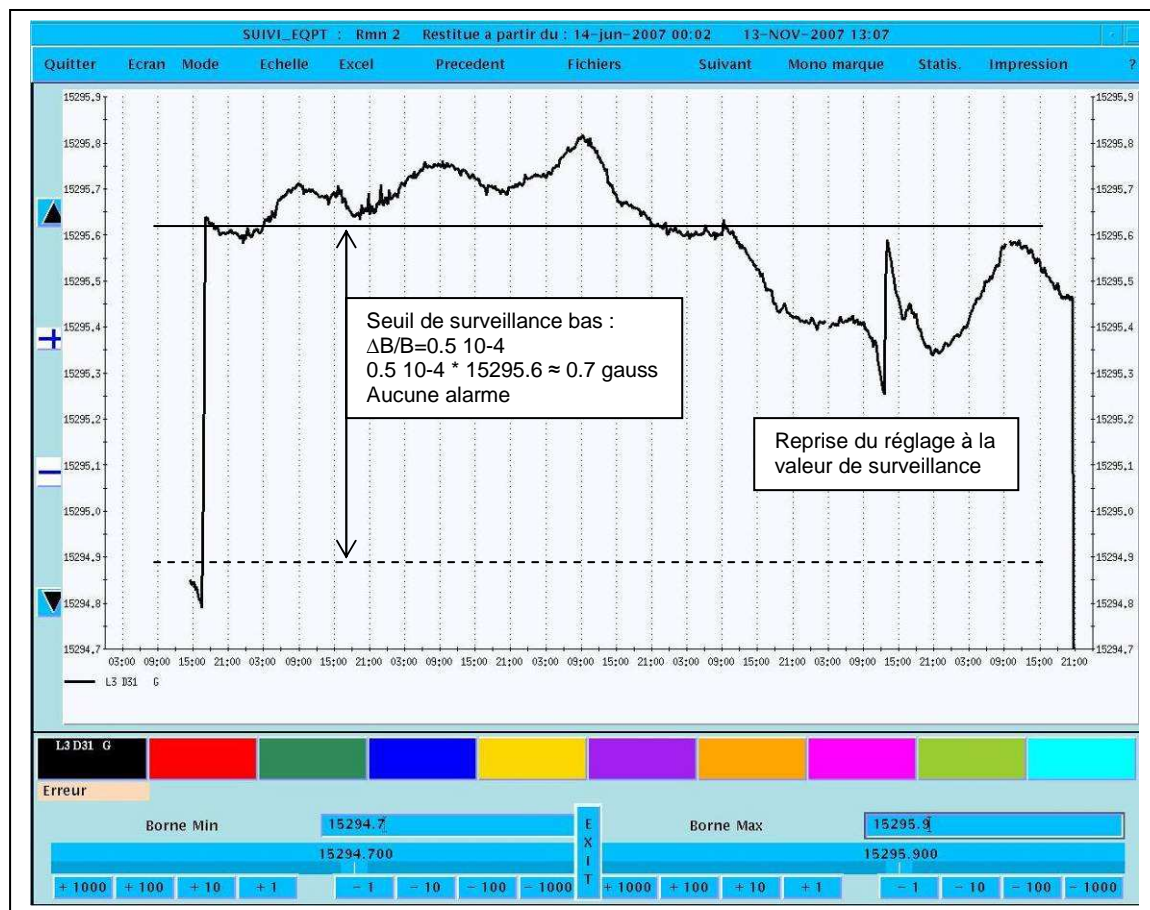


Figure 4-22 : Ecran de suivi du champ du dipôle L3D31 .

Un enregistrement du champ magnétique de la sonde fixe de CSS2 sur une durée de 60 heures est présenté figure 4-23. Il montre les correspondances avec les corrections de courant qui ont dû être effectuées. On constate deux phénomènes qui se superposent. La dérive naturelle du champ après cyclage de l'aimant et les dérives électroniques de l'alimentation liées aux variations de température jour/nuit. Dans certaines plages horaires ces dernières se compensent pratiquement, cf. courbe présentée entre 6h et 18h.

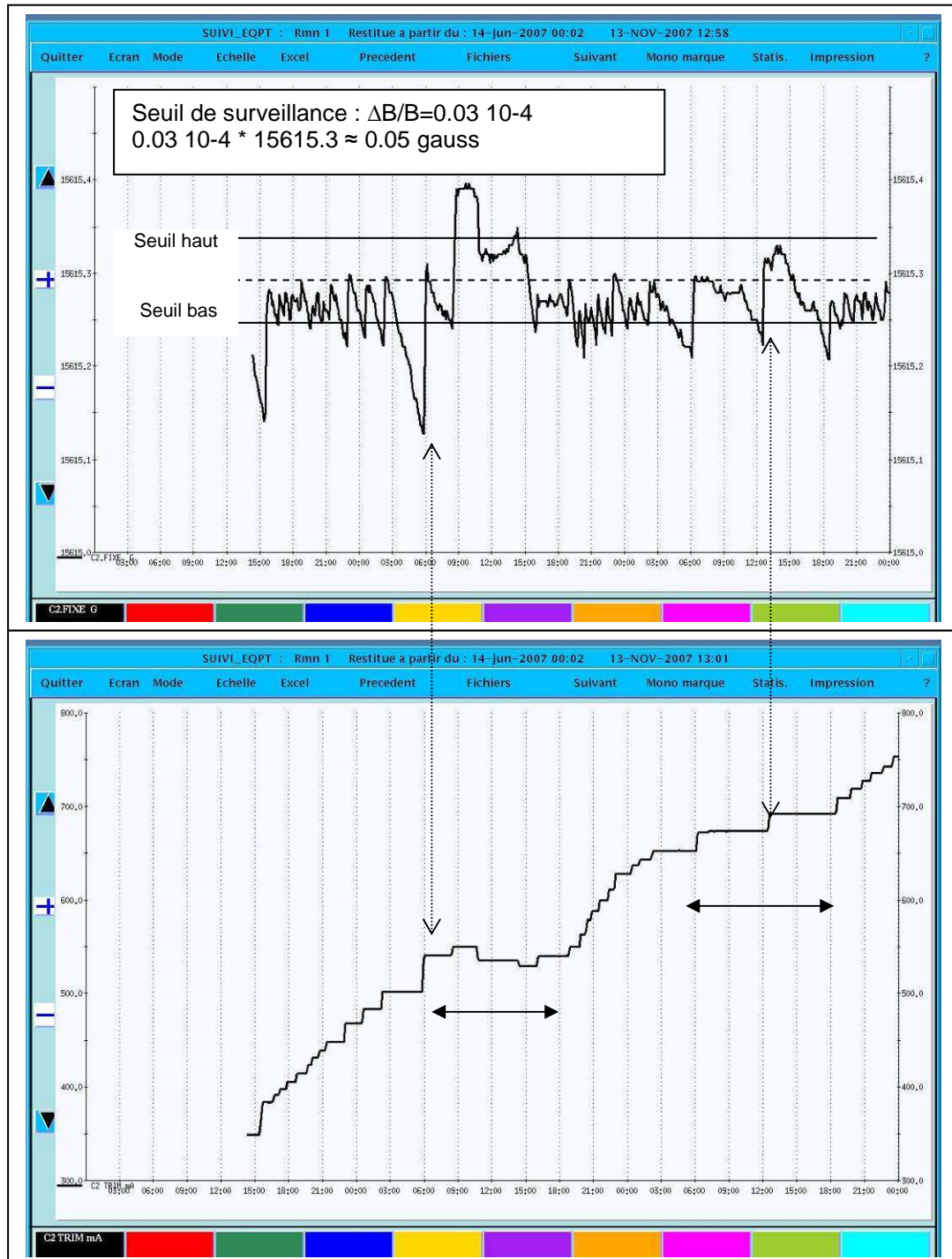


Figure 4-23 : Ecran de suivi du champ de la sonde fixe de CSS2 et des corrections de courant.

4.5 - Difficultés rencontrées et solutions apportées.

La nécessité de mesurer le champ n'avait pas été prise en compte lors de la conception de plusieurs aimants. Pour l'essentiel, les difficultés rencontrées sont imputable à cette carence. Or si le gradient de champ dépasse certaines limites, le système de détection du signal de résonance peut en être affecté, voire la détection automatique de ce signal impossible. La communication à distance ne permet donc plus alors de mesure et seule est parfois possible une mesure en local en visualisant le signal sur un oscilloscope. Nous reviendrons plus loin sur ces problèmes de positionnement des sondes.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs limites d'homogénéité de champ imposées par le constructeur, en ppm/cm

Type de sonde	Situation dans la gamme de champ		
Gamme de champ	bas	milieu	haut
1 0.043 T - 0.13 T	600	900	600
2 0.085 T - 0.27 T	1200	1600	1200
3 0.17 T - 0.54 T	1400	1400	1200
4 0.34 T - 1.08 T	800	900	1500
5 0.67 T - 2.1 T	350	600	250

Tableau 4-5 : Limites d'homogénéité de champ pour chaque sonde.

4.5.1 – Premier exemple : La surveillance du champ des CSS dans le secteur D

La surveillance permanente du champ des CSS est assurée par une sonde de type 5, qui est d'ailleurs la plus utilisée dans nos systèmes. Le tableau précédent (cf. Tableau 4-5) montre que cette sonde est l'objet des tolérances les plus serrées de la part du constructeur. Par ailleurs son positionnement à l'arrière du secteur D dans un doigt de gant à quelques centimètres du dernier tour de faisceau la rend particulièrement soumise aux inhomogénéités de champ. (cf. figure 4-24)

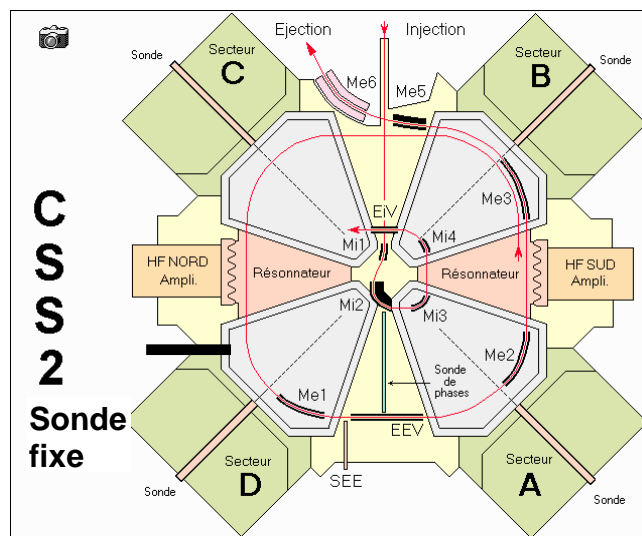


Figure 4-24 : Positionnement de la sonde fixe.



Figure 4-25 : Photo du doigt de gant aluminium et de sa fixation dans la chambre à vide.

Ce doigt de gant (cf. figure 4-25) est construit en aluminium car l'acier inoxydable initialement utilisé ne convenait pas, sa présence perturbant le champ magnétique à l'intérieur du doigt de gant.

Numériquement les contraintes de gradient de champ pour la sonde de type 5 sont les suivantes :

A 0.7500 T, en bas de sa gamme :

La valeur de gradient limite acceptable est de 350 ppm/cm.

$$\text{soit : } 0.75 * 3.5 \cdot 10^{-4} = 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ T/cm c'est à dire 2.6 Gauss/cm}$$

Et en haut de sa gamme à 1,7 T (champ maximum utilisé dans les CSS) :

La valeur de gradient limite acceptable est : 450 ppm/cm.

$$\text{soit : } 1.7 * 4.50 \cdot 10^{-4} = 7.6 \cdot 10^{-4} \text{ T/cm c'est à dire 7.6 Gauss/cm}$$

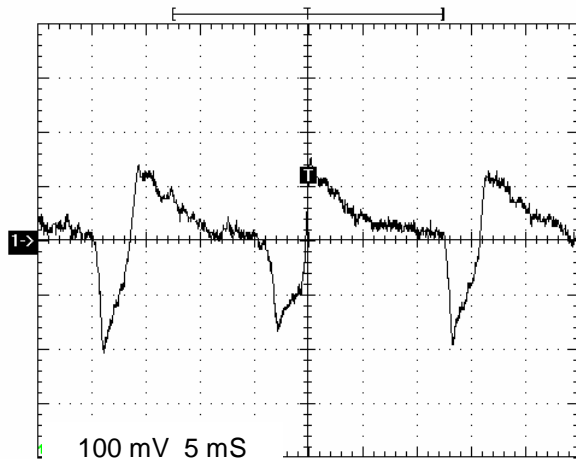
Le positionnement de cette sonde est d'autant plus délicat qu'il doit prendre en compte les inhomogénéités de champ dans les directions radiale et azimutale. Il a été affiné en plusieurs étapes au vu de la réponse de la sonde. La proximité de cette dernière avec le dernier tour de faisceau amène des difficultés supplémentaires dues au faisceau lui-même et au rayonnement induit. La position finale adoptée est à 30mm en dessous du plan médian et à 10mm de la position théorique du dernier tour de faisceau.

Malgré toutes ces précautions, pour certains faisceaux qui exigent des champs supérieurs à 1.5 T et des lois de champ isochrone où le gradient est supérieur à 8 Gauss/cm, seule la mesure manuelle avec l'oscilloscope est possible.

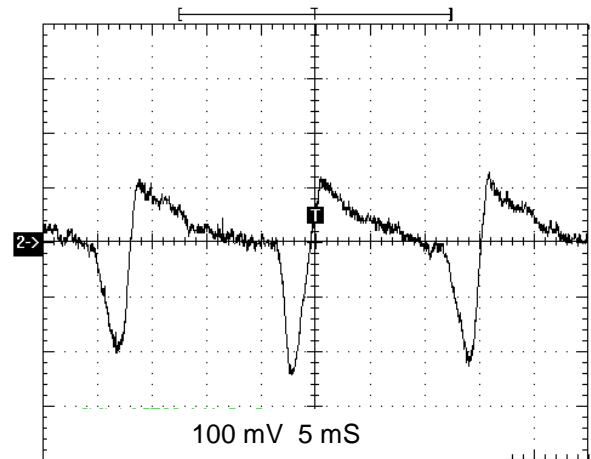
On pourrait envisager un autre positionnement de la sonde en la plaçant dans une zone de champ plus homogène, proche de l'axe secteur sur la chambre à vide, donc loin du plan médian. Une telle solution impliquerait une mécanique plus compliquée. La sonde et son câble ne pouvant être directement dans le vide, une mécanique identique à celle développée pour la mesure de champ par sondes de Hall pour les cyclotrons injecteurs, pourrait parfaitement convenir. (Voir paragraphe 5.3.2 p 80). Par contre, en cas de panne de la sonde, son remplacement nécessiterait une intervention lourde, en particulier le recul du résonateur HF. Actuellement la sonde dans son doigt de gant peut être changée à tout moment sans ouverture de la chambre à vide. Nous avons d'ailleurs été amenés à effectuer ce changement à la suite de la destruction de la sonde, soumise à des rayonnements anormalement élevés lors de réglages de faisceaux particuliers.

Exemple d'amélioration du signal obtenu en changeant la position de la sonde.

Il est à noter que l'amplitude du signal de résonance, compatible avec une mesure automatique, est de 200 mV.



Oscillogramme 1



Oscillogramme 2

Figure 4-26 : Visualisation du signal de résonance.

On constate sur la figure 4-26 que dans les conditions limites de champ, à 1.5 T, le positionnement de la sonde à 20 mm du dernier tour du faisceau ne permet pas de mesure automatique (cf. oscillogramme 1). Par contre (cf. oscillogramme 2), alors que la sonde a été placée à 10 mm du dernier tour et à 30 mm du plan médian, la recherche automatique fonctionne.

4.5.2 – Deuxième exemple : Mesure RMN sur les trois dipôles en sortie du cyclotron

CIME

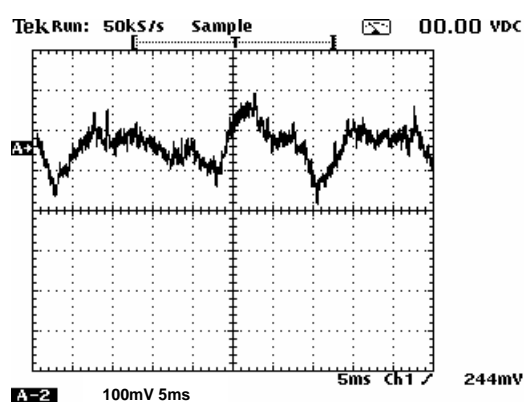
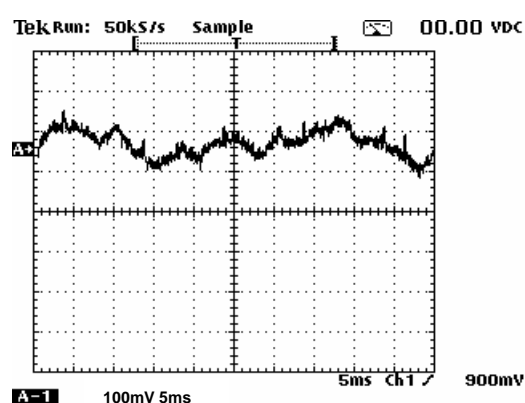
Dans quelques dipôles la position a été très difficile à trouver.

A - Cas du dipôle L5.G.D11.

La chambre à vide occupant en largeur toute la zone de champ homogène du dipôle, la mesure est impossible avec une sonde 5, même en recherche manuelle du signal. Bien qu'une sonde de type 4 accepte une mesure avec un gradient jusqu'à $16 \cdot 10^{-4}$ T/cm, les essais montrent que la mesure est seulement possible en local.

Comme on peut le remarquer sur la figure 4-27, le signal est de plus forte amplitude à 0.6 T car le gradient du dipôle à la position de mesure est plus faible qu'à 1 T.

Aucune mesure RMN n'a été possible sur ce dipôle. Nous l'avons équipé d'une mesure par sonde Hall. Ce point sera abordé dans le chapitre 5 de ce document.



Oscillogramme 1

Mesure du champ à $B = 1$ T

Le signal est très difficile à trouver, il est de très faible amplitude.

Oscillogramme 2

Mesure du champ à $B = 0.6$ T

Le signal est de faible amplitude.

Figure 4-27.

B - Cas des dipôles L5.G.D31 et L5.G.D32.

L'extension en champ nécessaire pour ces dipôles, qui sont identiques, nécessite deux sondes de types 4 et 5.

Comme le montre l'oscillogramme de la figure 4-28, la sonde de type 4 positionnée contre la chambre à vide fonctionne correctement, et ce sur toute sa gamme de champ.

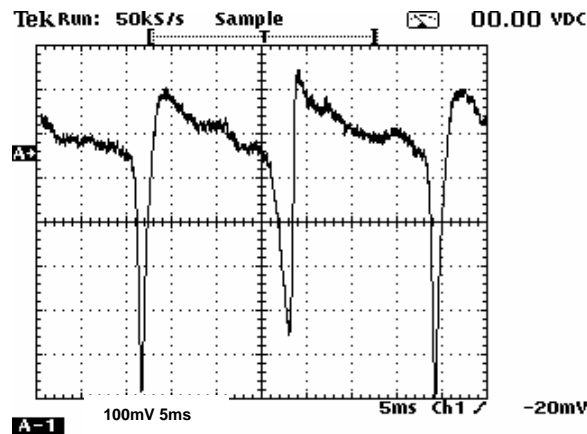


Figure 4-28 : Mesure du champ $B = 1$ T

Par contre il est impossible d'utiliser la sonde de type 5 à cette position contre la chambre à vide et dans le plan médian de l'entrefer, car l'amplitude du signal de résonance est trop faible (cf. figure 4-29).

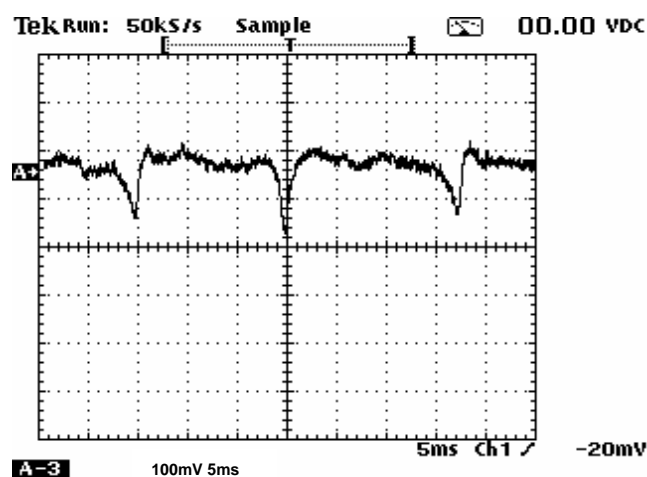


Figure 4-29 : - Mesure du champ $B = 1$ T

Lorsque l'on s'éloigne de la chambre à vide et que l'on s'écarte du plan médian, le signal augmente. La position optimale est difficile à déterminer expérimentalement, elle a été trouvée à 2 mm de la chambre à vide et à 3 mm en dessous du plan médian. Les deux oscillogrammes de la figure 4-30 ci-dessous montrent qu'après optimisation, la recherche automatique du signal de résonance est possible.

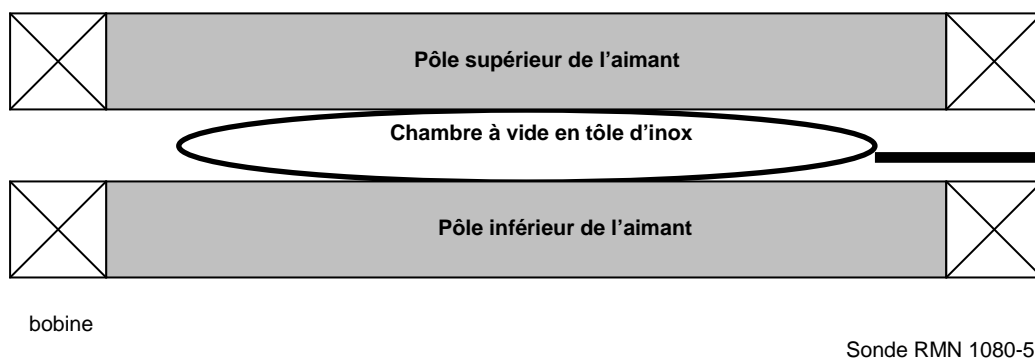
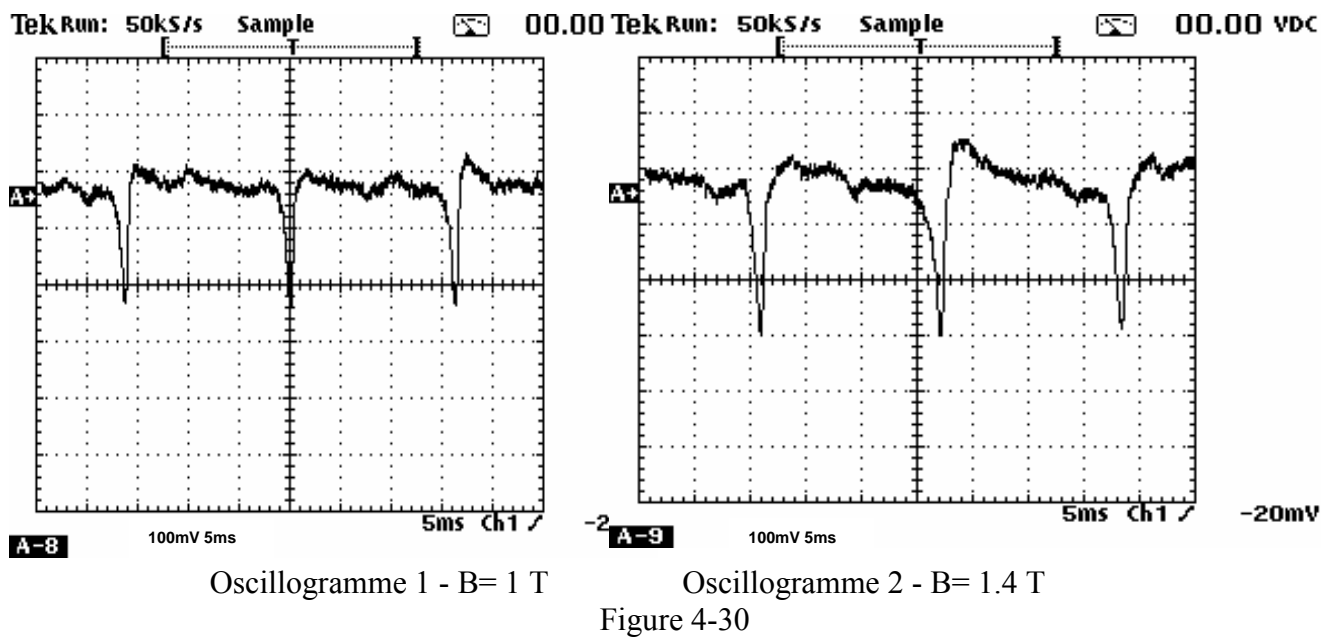


Figure 4-31 : Représentation schématique du dipôle.

Ce résultat est paradoxal car lorsqu'on se rapproche du bord de l'aimant en s'écartant de la chambre à vide, l'homogénéité est sensée se détériorer (cf. figure 4-31). En fait, l'acier inoxydable constituant la chambre à vide n'est pas parfaitement amagnétique et il perturbe le champ et détériore le gradient, dans son domaine d'influence.

Signalons pour terminer que la sonde est maintenue dans sa position grâce à une mécanique appropriée (cf. figure 4-32), dont nous avons défini le cahier des charges et suivi la fabrication.



Figure 4-32 : Vues du dipôle et de son dispositif de positionnement de la sonde.

4.5.3 – Mesure RMN sur un dipôle de la salle d'expérience LISE (D3)

A - Compensation active du gradient de champ.

Cet exemple est intéressant car une technique de compensation active de gradient a été mise en œuvre.

Dans ce dipôle aucune position de mesure n'a pu être trouvée sans que la sonde ne devienne un obstacle pour le faisceau. De chaque côté de la sonde nous avons donc mis en place des bobines de compensation de gradient, qui améliorent l'homogénéité du champ autour du point de mesure.

Ces bobines sont en fait deux circuits imprimés qui enserrant la sonde RMN et créent une excitation compensatrice (cf. figure 4-33)

Voir le document du constructeur en annexe 2.

Afin d'éviter un décalage dans la mesure de la sonde, le point de mesure actif de celle-ci doit être précisément placé au passage à zéro de la courbe de champ des bobines de correction.

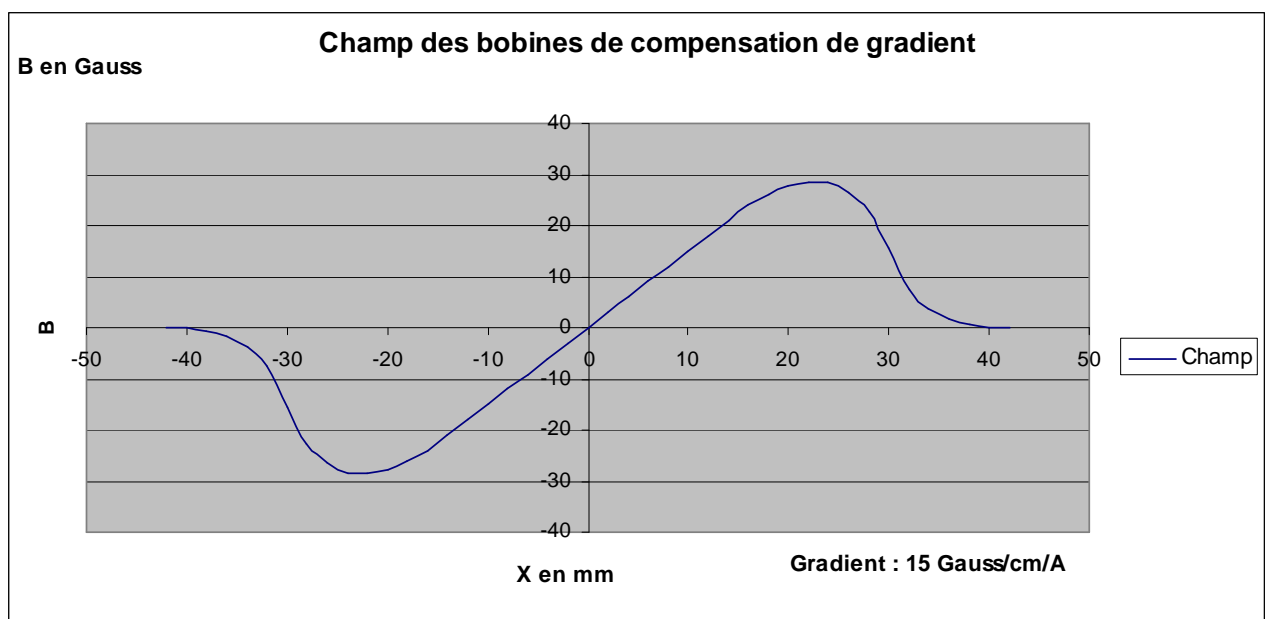


Figure 4-33 : Courbe $B=f(x)$ à $I=1$ A

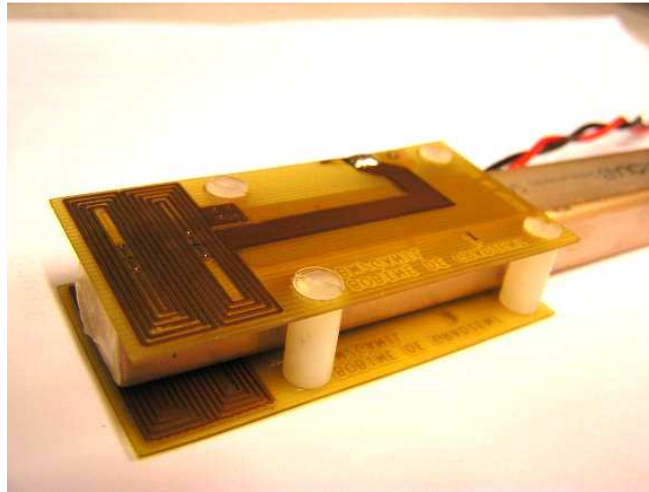


Figure 4-34 : Vue des bobines de compensation

La version commerciale de ces bobines de compensation de gradient ne convenant pas à la géométrie de notre système, un nouveau circuit imprimé a été développé (cf. figure 4-34). Nous en avons profité pour augmenter la section des pistes de la bobine afin de pouvoir faire circuler un courant de 2A et ainsi doubler la valeur du gradient de compensation.

B - Mise au point de la mesure pour le dipôle D3.G.D32

La mécanique de positionnement a du aussi être développée pour rendre la sonde escamotable. En effet, comme on peut le voir sur le plan ci-dessous, la ligne de faisceau LISE 2000 doit sortir sans déviation du dipôle D3.G.D32 et dans ce cas la sonde en position de mesure ne doit plus être un obstacle pour le faisceau.

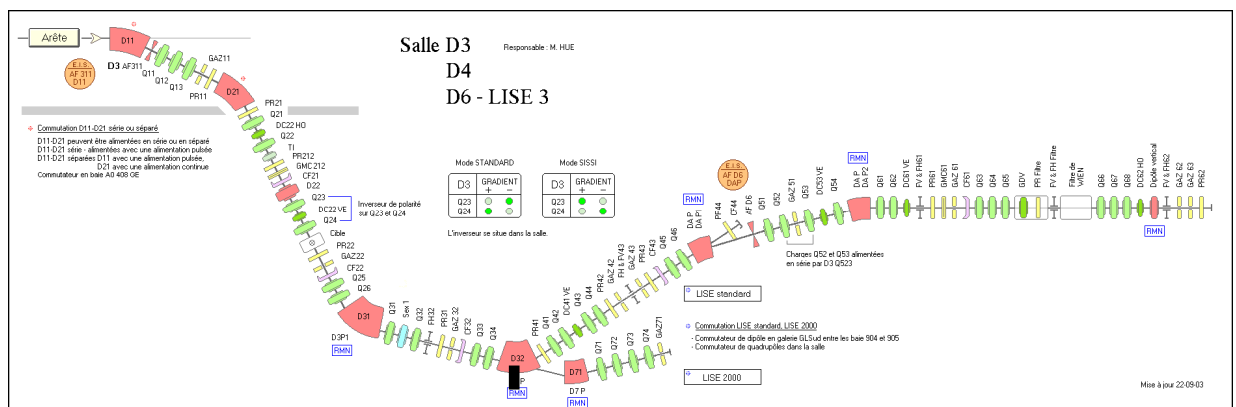


Figure 4-35 : Plan des lignes de faisceau

Une représentation schématique de l'ensemble : dipôle-chambre à vide-sondes de mesure (cf. figure 4-36) ainsi qu'une photographie de la mécanique de positionnement des sondes (cf. figure 4-37) sont présentées ci-dessous

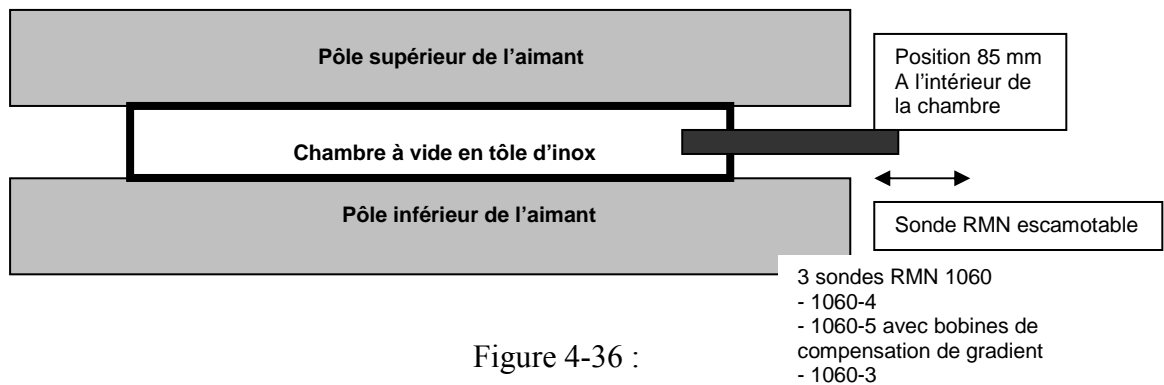


Figure 4-36 :



Figure 4-37 : Photo de la mécanique escamotable des sondes RMN

Afin de couvrir la gamme de champ utile pour ce dipôle, trois sondes sont nécessaires. La mise en œuvre des sondes de type 3 et 4 n'a pas posé de problème au vu de leur sensibilité aux inhomogénéités de champ. Par contre, la sonde de type 5 a nécessité l'utilisation de bobines de compensation de gradient afin de permettre une mesure automatique sur toute la gamme de

champ. Les sondes sont empilées les unes sur les autres et placées dans la mécanique escamotable.

Les bobines de compensation destinées à la sonde 5 perturbent la mesure des sondes 3 et 4 compte tenu de leur proximité. Pour cette raison le courant de compensation est annulé lorsque la mesure mobilise les sondes 3 et 4. Le recouvrement des gammes des sondes 4 et 5 permet de vérifier la validité de la méthode de compensation. (cf. figure 4-38)

La position restrictive vis-à-vis du faisceau à l'intérieur de la chambre à vide est située à 85 mm par rapport à la paroi de celle-ci (cf. figure 50 présentée page précédente).

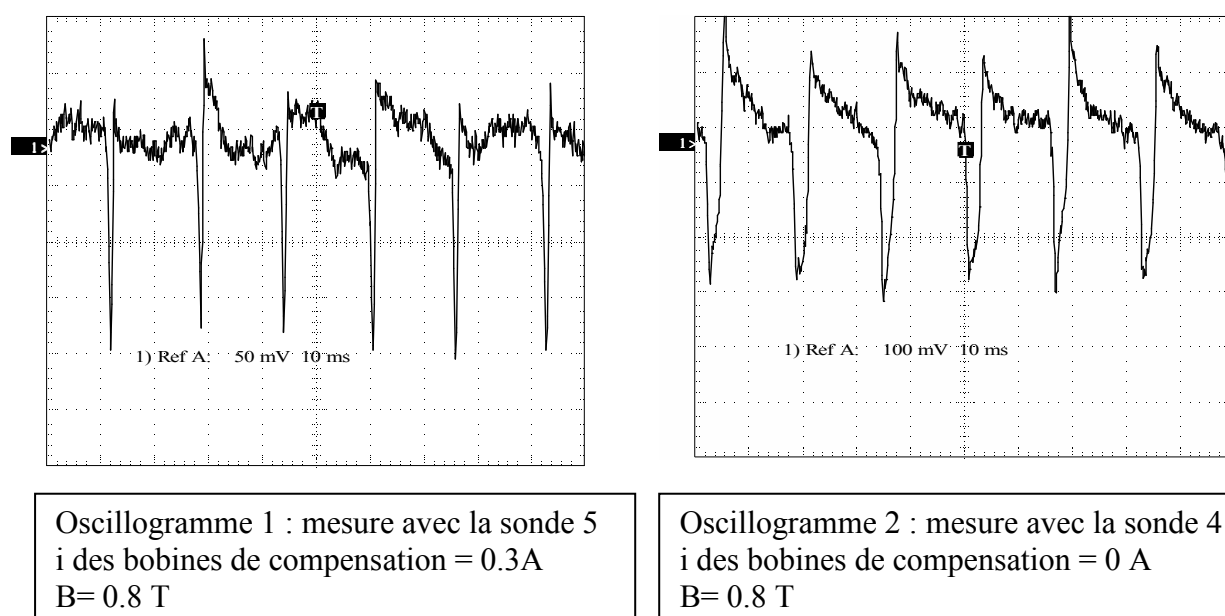


Figure 4-38 : Comparaison des signaux

Au vu des signaux obtenus sur les deux oscillogrammes, aucun problème de recherche automatique n'est posé à ce niveau de champ.

Les valeurs de courant nécessaires pour les bobines de compensation ont été relevées à différentes inductions (cf. tableau 6). Selon le champ à mesurer, l'application règle l'alimentation adéquate des bobines de compensation.

Niveau de champ	0.8 T	1.4 T	1.6 T
Courant dans l'alimentation	0.3A	0.9A	1.6A

Tableau 4-6

Cette technique a également été testée sur les sondes RMN du secteur C de CSS1 et CSS2, où ces sondes sont destinées à régler la loi de champ isochrone sur tout l'axe de ce secteur. La méthode ne s'est malheureusement pas avérée concluante car le niveau de la compensation s'est révélé insuffisant pour assurer au gradient une valeur convenable sur toute l'excursion radiale.

4.5.4 – Positionnements particuliers de quelques sondes RMN

Pour conclure ce paragraphe dans lequel nous avons recensé quelques exemples intéressants, deux autres positionnements plus standards sont présentés ci-dessous (cf. figure 4-39 et 4-40)

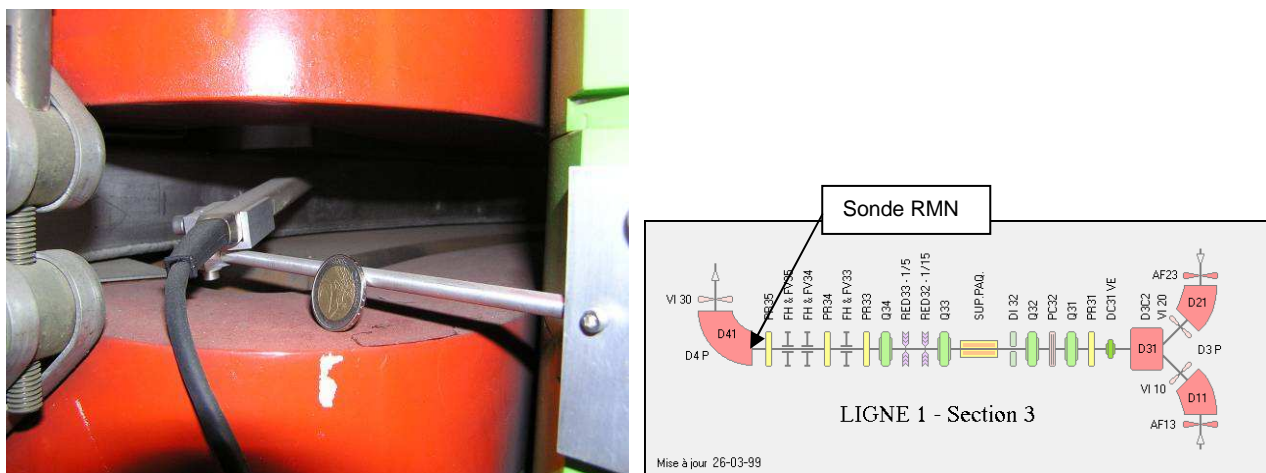


Figure 4-39 : Inclinaison de la sonde afin de maximaliser le signal de résonance.

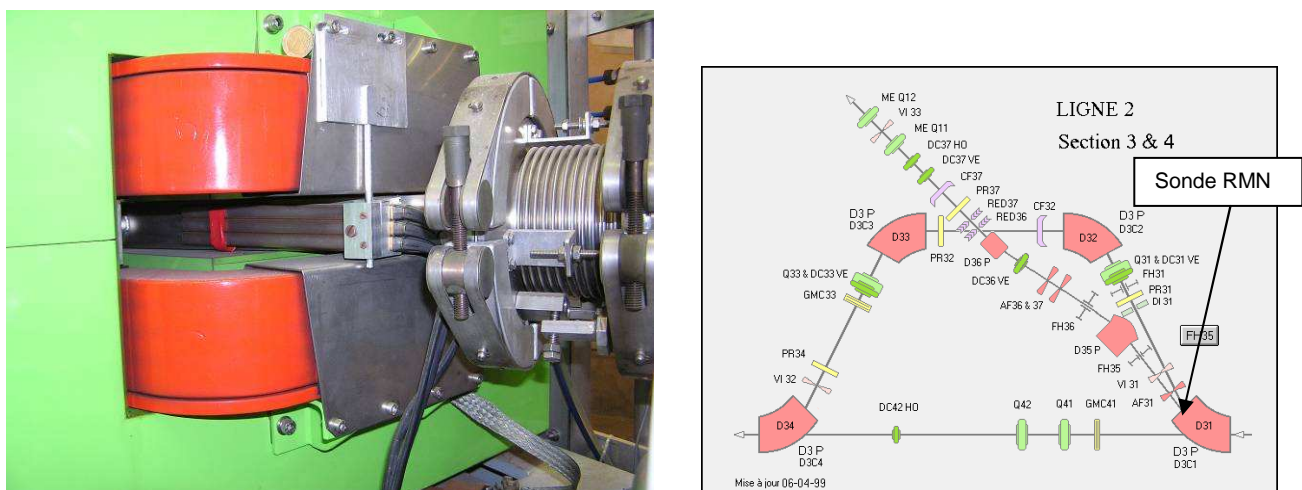


Figure 40 : Superposition de trois sondes (3, 4 et 5) dans le dipôle L2.G.D31

4.6 – Futures évolutions

Le GANIL est un des seuls clients METROLAB au monde à utiliser les possibilités du PT2025 (8x8 voies), aussi près de son maximum : 55 sondes sur l'ensemble de l'accélérateur sont reliées à l'unité centrale.

La société METROLAB prévoit d'ici quelques années des difficultés d'approvisionnement en composants, et donc de fabrication et de réparation des PT2025. Un nouveau teslamètre, le PT2026, est destiné à le remplacer.

Un document en annexe 3 présente les nouveautés envisagées. L'objectif de la société est d'améliorer sensiblement la mesure en présence d'un champ inhomogène.

La réflexion menée par la société autour de ce nouvel appareil s'enrichit de notre expérience dans le domaine. Plusieurs éléments du cahier des charges ont été explorés :

- compatibilité avec le système actuel, en particulier au niveau de la connectique des sondes et multiplexeurs.
- Possibilité d'étendre la gamme de champ jusqu'à 0.01 T, voire moins.
- Accessibilité depuis la face avant à toutes les voies de mesures de l'appareil.
- Diminution du temps de mesure grâce à la possibilité de reprendre à la volée une mesure déjà faite si le système n'a pas été sollicité par ailleurs.

La société METROLAB se sert de l'installation du GANIL pour promouvoir son matériel sur son site Internet. De nombreux contacts ont été noués avec ses ingénieurs tout au long de la mise au point de nos systèmes de mesure. Le GANIL constituera un champ d'expérience précieux, permettant de tester le nouvel appareil et de valider ses performances en zone de champ inhomogène.

Chapitre 5

Dans ce chapitre le développement du système de mesure par sonde de hall ainsi que la mise en place de deux mesures particulières sont présentées.

5 - Système de mesure du champ magnétique par Sonde de Hall

Dans certains cas, la mesure par sonde RMN ne peut être mise en œuvre ou ne se justifie pas par rapport à son coût.

Nous avons énoncé dans le paragraphe 2-3 les motivations qui nous ont amené à mettre en œuvre des mesures à effet Hall, et nous venons de rencontrer dans le chapitre précédent un cas où la place disponible ne permet pas de mesure RMN. (cas du dipôle L5.G.D11).

5.1 – Choix du système

Partout où le champ n'est pas suffisamment homogène pour permettre une mesure RMN, nous avons envisagé la sonde de Hall.

Avantages:

Les exigences d'homogénéité de champ ne se posant pas, la mesure est possible en tout point à l'intérieur de l'entrefer de l'aimant, ce qui facilite le positionnement de la sonde.

Le système est moins coûteux que la mesure par RMN, l'exploitation du signal se résumant à une simple mesure de tension, déjà couramment pratiquée au GANIL.

Inconvénients :

La sonde de hall est sensible à la température. Cet aspect a fait l'objet d'un développement particulier que nous verrons plus loin dans le document.

La non-linéarité de la réponse de la sonde ne pose pas de problème pour la surveillance du champ car cette réponse peut être linéarisée autour d'un point de consigne si les variations sont petites. Si toutefois on souhaitait augmenter la plage de mesure, il deviendrait nécessaire d'étalonner la sonde de Hall point par point, avec une sonde RMN par exemple.

La tenue aux rayonnements n'est pas démontrée. Selon le positionnement sur les lignes de faisceau, la sensibilité aux rayonnements peut être plus ou moins grande.

Au GANIL, des capteurs de Hall ont été initialement installés dans les CSS pour équilibrer le champ entre secteurs. Les effets du rayonnement rendaient nécessaires un réétalonnage trop fréquent. Ces sondes ont été remplacées par des sondes RMN. Vue cette sensibilité, les sondes et leur électronique associée sont positionnées judicieusement, par exemple derrière les blocs de béton présents dans les casemates.

5.2 – Développement et mise en place du système

5.2.1 – Quelques généralités

Les sondes de Hall ont été mises en place majoritairement pour répondre à la problématique de surveillance du champ. On peut donc être amené à effectuer des mesures sur de longues durées et les dérives dues à la température doivent être prises en compte.

Nous avons eu le choix entre deux méthodes.

La première méthode est de thermostatier le capteur. Cette solution est celle qui est utilisée sur le Banc Universel de Mesures Magnétiques. Les boîtiers de mesures, qui servent à cartographier les aimants du GANIL avant leur installation sur les lignes de faisceau, sont constitués de plusieurs sondes de Hall. Ces sondes sont collées sur un barreau de cuivre qui est maintenu à 37°C au 1/10 de °C près.

La deuxième méthode consiste à mesurer la température en même temps que la tension de Hall et de corriger par calcul cette mesure.

C'est cette deuxième solution qui a été retenue, la première nécessitant un développement assez lourd et pénalisant du point de vue de l'encombrement de la sonde et de l'électronique associée.

Dans ces conditions, il s'agit de gérer deux mesures de tensions, une qui est l'image du champ magnétique et l'autre qui est l'image de la température (cf. figure 5-1).

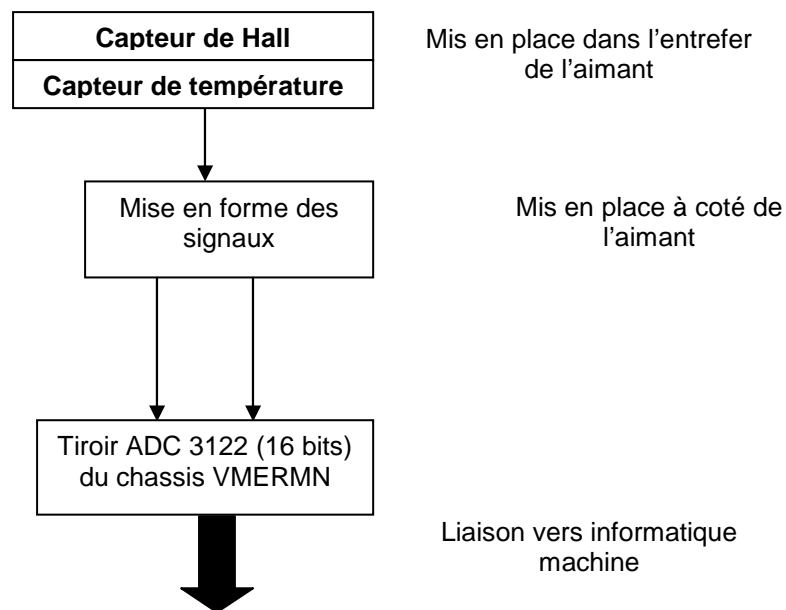


figure 5-1 : Schéma fonctionnel de l'appareil de mesure de champ et de température

Les circuits de mise en forme des signaux sont intégrés dans un boîtier. (cf. figure 5-2)

Voir schéma de l'ensemble en annexe 6.



Figure 5-2 : boîtier de mise en forme des signaux



Figure 5-3 : Capteur de mesure.

Il est à remarquer que la sonde de hall et le capteur de température sont collés sur un pavé de cuivre qui augmente l'inertie thermique. L'ensemble est mis en place dans un boîtier en résine transparente (cf. figure 5-3).

5.2.2 – Mesure du champ

Après une exploration des systèmes de Hall qui répondent au cahier des charges énoncé au paragraphe 2-3, notre choix s'est porté sur un teslamètre YM12-3-2-2T à effet Hall de la société SENIS [13] (cf. figure 5-4). Ce système également utilisé au CERN, s'est avéré le seul à disposer d'une dynamique de mesure qui corresponde exactement à nos besoins (jusqu'à 2 T).

Sa réponse est de : 5 Volts / T soit 0.5 mV / Gauss.



Figure 5-4 : Teslamètre YM12-3-2-2T

Sa sensibilité à la température est meilleure que 100 ppm/°C, soit pour un champ de 1 T des variations inférieures à 10^{-4} T / °C (<1Gauss/°C).

A titre indicatif les défauts de linéarité énoncés par le constructeur sont :

$$\text{Si } B \leq 1\text{T}, \quad \Delta B/B \leq 0.05\%$$

$$\text{Si } B \leq 2\text{T}, \quad \Delta B/B \leq 0.1\%$$

La documentation technique est donnée en annexes 4 et 5

5.2.3 – Mesure de la température

Elle est assurée par un semi-conducteur LM335Z de chez SGS THOMSON (voir caractéristiques en annexe 7). La tension de sortie est de 0 Volts à 0°K et son gain est réglé à 10mV/°K ou °C. Sa réponse est linéaire jusqu'à 100°C.

Nous n'avons pas cherché à mettre en place un instrument compliqué. Un montage simple suffit largement pour déterminer ce qui nous importe, à savoir la correction d'une réponse en champ à la suite de variations de température. Le boîtier de mesure de champ nécessitant une alimentation 12 Volts, nous avons adopté la même tension de polarisation pour le capteur de température. Le réglage du potentiomètre permet l'étalonnage de la tension de sortie pour une température connue (cf. figure 5-5).

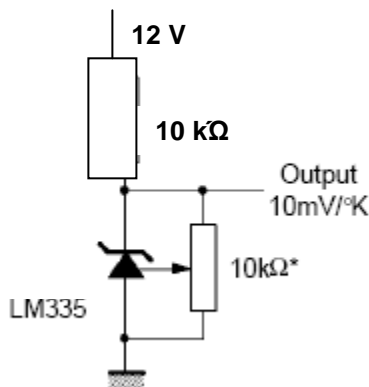


Figure 5-5 : Schéma du circuit autour du capteur de température.

5.2.4 – Traitement des tensions des deux capteurs.

Le choix s'est rapidement porté sur un tiroir ADC 3122 16 bits qui est déjà utilisé sur diverses applications par le groupe informatique machine. Ce tiroir dispose de 64 voies de conversion. La gamme de tension d'entrée choisie est : 0 – 10V. Les caractéristiques sont données en annexe 8.

Pour résumer, l'excursion des signaux à traiter est de :

0 V – 10 Volts sur toute l'amplitude 0 – 2 T, pour le capteur de champ.

Sensibilité : 0.5mV / 10^{-4} T.

2.88 V – 3.03 Volts sur la plage 15°C – 30°C pour le capteur de température.

Sensibilité : 10mV/°C.

Le LSB de ce convertisseur est égal à 0.15mV, ce qui correspond pour ces deux capteurs à

$3 \cdot 10^{-5}$ T (0.3 Gauss) et 0.015 °C.

Actuellement onze sondes de Hall surveillent le champ. Les deux premières ont été réalisées en interne. La multiplication des demandes nous a amené à établir un dossier de fabrication à usage externe et la production est été ensuite assurée par un sous-traitant (voir en annexe 6).

5.2.5 – Détermination de la correction de la réponse en champ en fonction de la température

Compte tenu de la plage de variation de la température (15°C – 30°C) nous linéarisons les variations du champ mesuré en fonction des variations de température, $\Delta \theta$.

Dans ces conditions le champ B_{HC} après correction s'écrit :

$$B_{HC} = B_{HM} - K(B_{HM}) * \Delta \theta \quad \text{Equation 5-1}$$

Avec B_{HM} : Valeur du champ mesuré avec la sonde de hall en T

$K(B_{HM})$: Coefficient de correction en T /°C (fonction du niveau de champ mesuré)

$\Delta \theta$: Variation de température en °C

K est déterminé expérimentalement en comparant les mesures, enregistrées sur une durée de 24 heures, avec celles des sondes RMN placées dans le même dipôle.

Un exemple est donné pour un champ de 1.2 T. Avec un coefficient $K = 0.7 \cdot 10^{-4} \text{ T/}^\circ\text{C}$ la courbe rose coïncide au mieux (cf. figure 5-6).

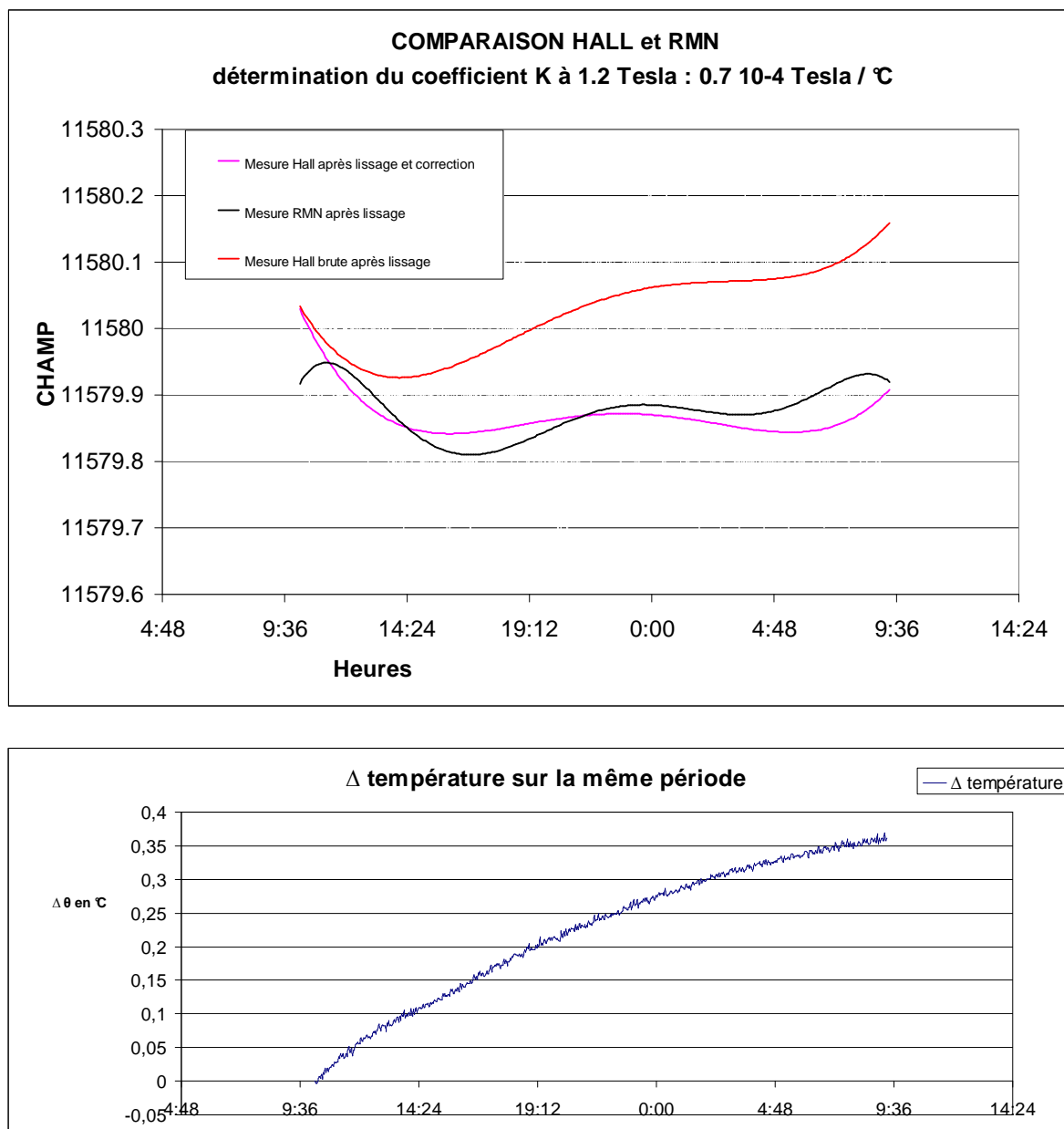


Figure 5-6 : Enregistrement pendant 24 h des mesures de champ et des variations de température.

On peut remarquer sur l'enregistrement ci-dessous que la résolution des mesures de Hall est largement dégradée par rapport à la mesure RMN.

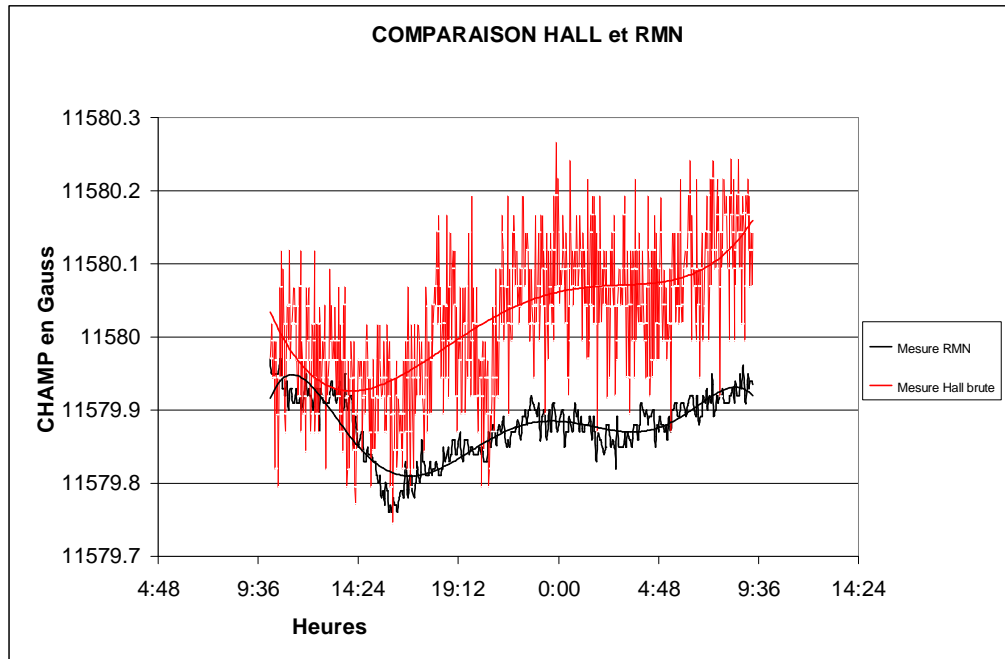


Figure 5-7 : Comparaison mesure de Hall / mesure RMN

Ces mesures ont été reproduites tous les 0.2 T sur la plage 0 – 1.4 T. Les coefficients ont été ajustés et relevés. Le coefficient K (T/°C) est correctement décrit par une approximation polynomiale de degré 3. (cf. figure 5-8).

$$K = (1.6168 B^3 - 2.7899 B^2 + 1.5923 B + 0.0008) 10^{-4} \quad \text{Equation 5-2}$$

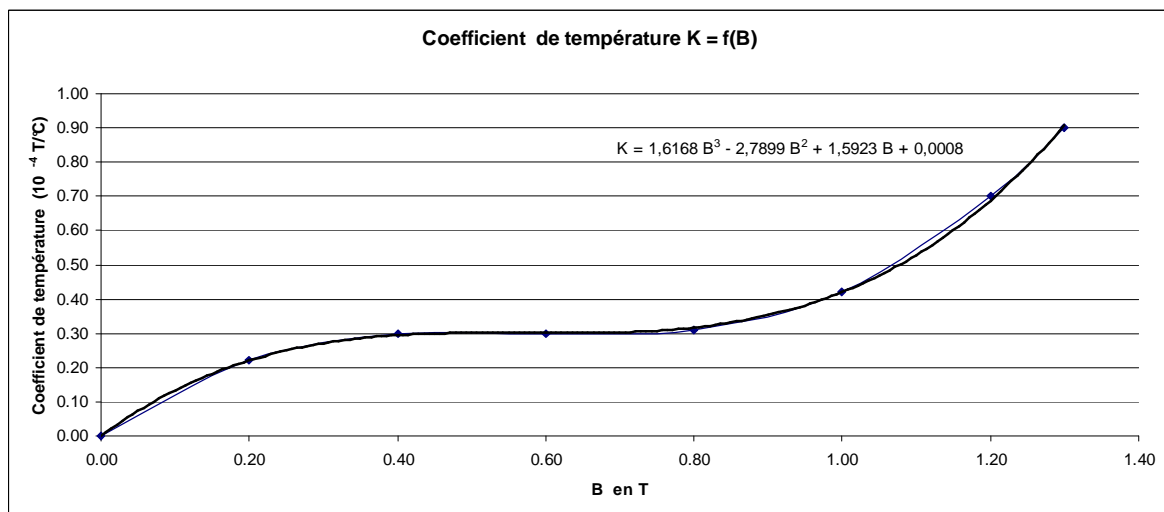


Figure 5-8 : Courbe du coefficient de correction de température.

5.2.6 – Intégration de la correction dans l'algorithme de mesure de la surveillance du champ.

Les mesures sont faites seulement à partir du moment où l'on active la surveillance du champ du dipôle. Le champ mesuré à ce moment et la température sont initialisés. Les points suivants sont corrigés.

Une fois ces corrections faites, le processus de surveillance suit le cheminement déjà décrit avec les systèmes RMN.

Un enregistrement du champ, effectué pendant une période de 6 jours, sur un dipôle de la ligne de faisceau Très Basse Energie de SPIRAL (IC.G.D31), illustre bien l'intérêt et les performances du système (cf. figure 5-9).

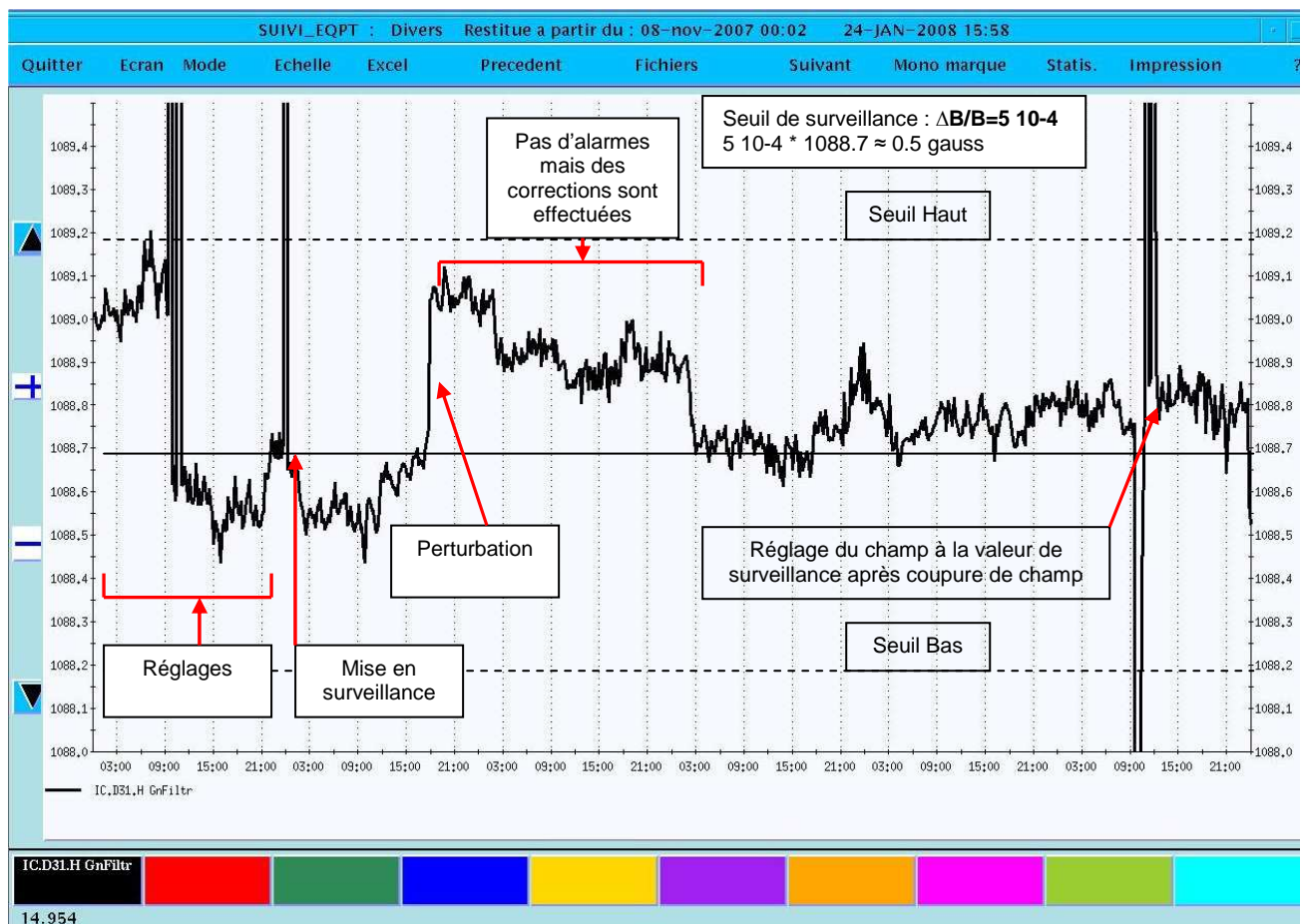


Figure 5-9 : Enregistrement des variations de champ du dipôle IC.G.D31.

5.3 – Développements particuliers

5.3.1 – Sonde du dipôle de sortie de source : I1.PF.D0.HALL

Avant l'implantation de cette sonde aucune mesure n'était effectuée sur ce dipôle.

Les opérateurs devaient effectuer leurs réglages uniquement à partir de la caractéristique $B=f(I)$ du dipôle. La connaissance précise du champ s'est avérée de plus en plus pertinente pour les réglages.

Ce dipôle est destiné à produire le champ pour sélectionner un ion en sortie de la source en vue de l'accélérer. De ce fait, il est solidaire ainsi que l'appareil de mesure de la plate-forme portée à 100 KVolts. Il est donc impossible de récupérer directement les 2 tensions de sortie (images du champ et de la température). Nous avons mobilisé, pour nous affranchir de cette difficulté, une solution simple en utilisant des équipements déjà en place sur la plate-forme. Deux voies du tiroir ADC 16 bits de l'automate SIEMENS (S-7-300) étaient disponibles. Une liaison par fibre optique vers un autre automate a permis de franchir cette barrière de potentiel. Un tiroir DAC 15 bits d'un second automate reconstitue les signaux analogiques et les traite, comme les autres signaux, dans le tiroir ADC du châssis VME (cf. figure 5-10).

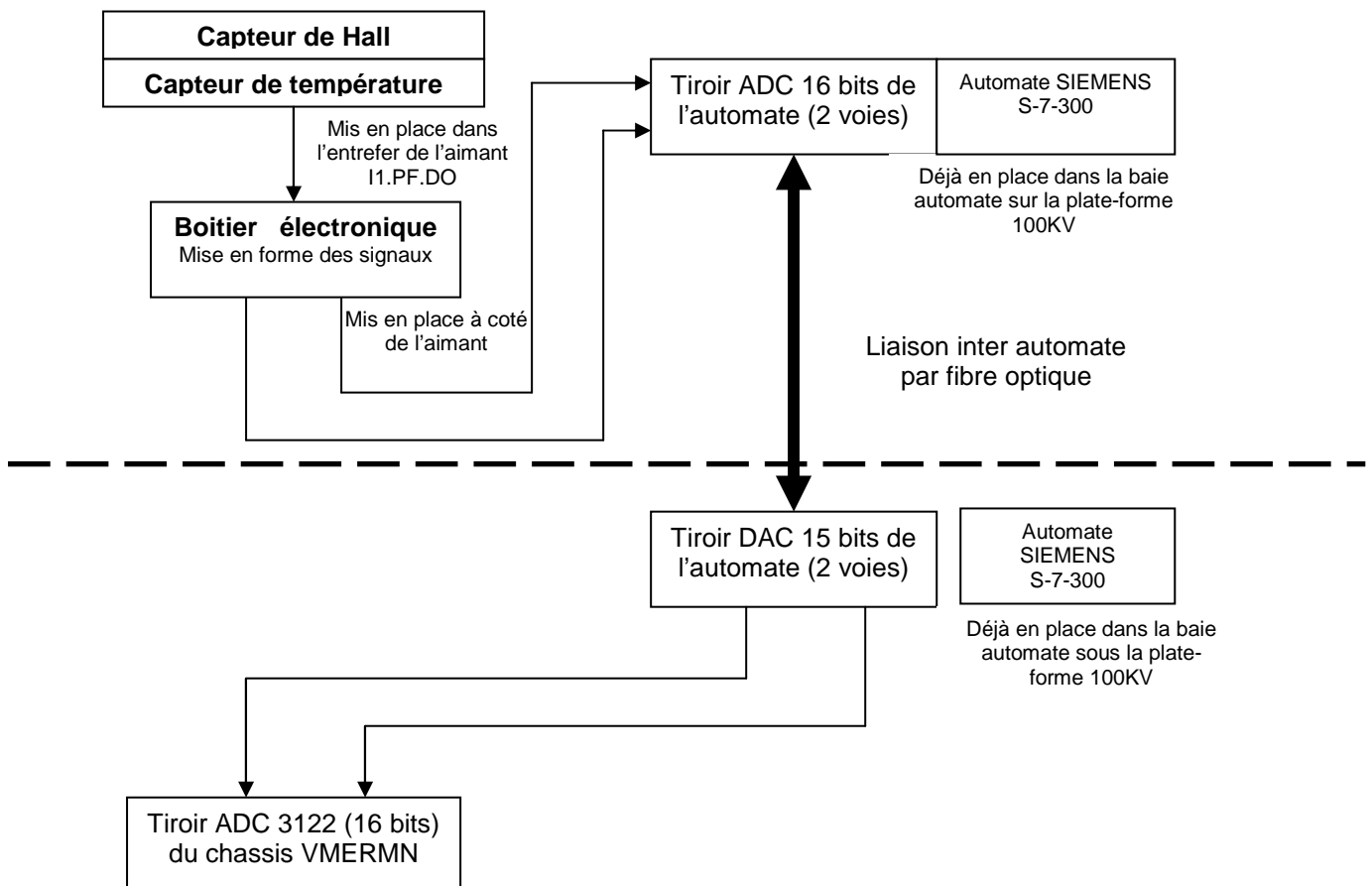


Figure 5-10 : Schéma fonctionnel de l'ensemble.

5.3.2 – Sonde de surveillance des cyclotrons injecteurs

Dans ces équipements la géométrie des pôles engendre un gradient azimuthal et radial excluant la mesure avec une sonde RMN. La cartographie magnétique des injecteurs qui permet de déterminer une zone de gradient de champ minimum dans l'entrefer de l'électroaimant, a montré que ce gradient est supérieur à $8 \cdot 10^{-4}$ T/cm dans la zone la plus favorable.

Pour surveiller le champ des injecteurs, I1 et I2, deux sondes de Hall avec leur correction de température ont été spécialement développées avec leur mécanique. La sonde de mesure et son câble ne pouvant pas être directement dans le vide, une mécanique adaptée a été conçue. Le boîtier qui supporte les sondes de Hall et de température a du être miniaturisé pour passer dans les orifices disponibles de la chambre à vide. Un tube annelé souple en inox permet de positionner la sonde depuis l'extérieur de la chambre, jusque dans l'entrefer de l'aimant.

Mécanique de la sonde de l'injecteur I1 (cf figures 5-11 et 5-12).

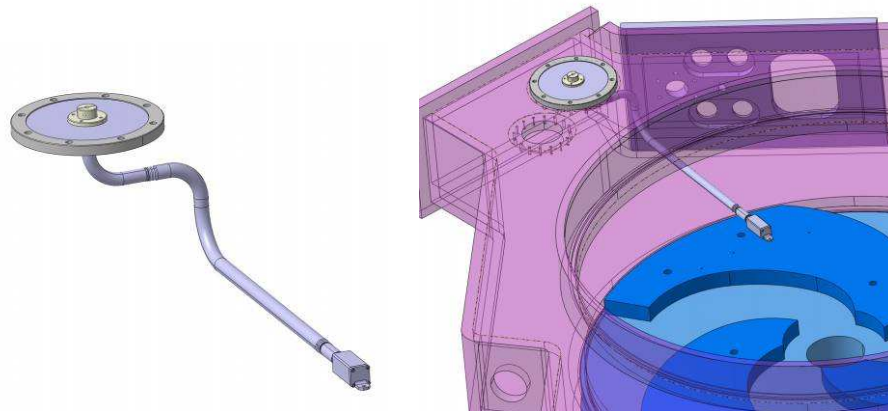


Figure 5-11 : représentation en CAO de la mécanique de positionnement de la sonde de I1 et de sa position sur le pôle spiralé dans la chambre à vide.

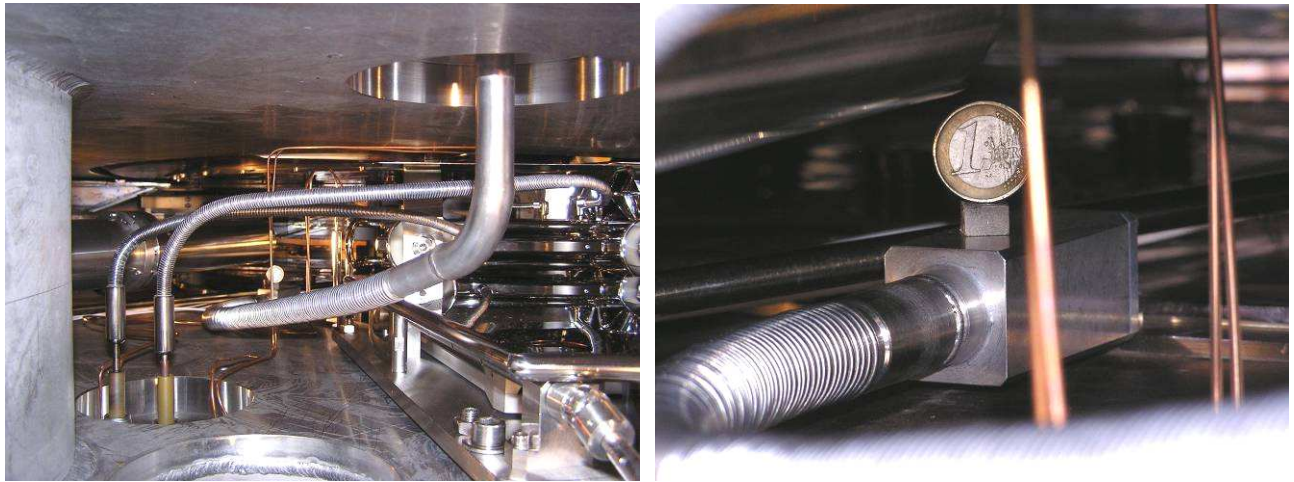


Figure 5-12 : Photos de la mécanique de positionnement de la sonde de I1

Mécanique de la sonde de l'injecteur I2 (cf figures 5-13 et 5-14)

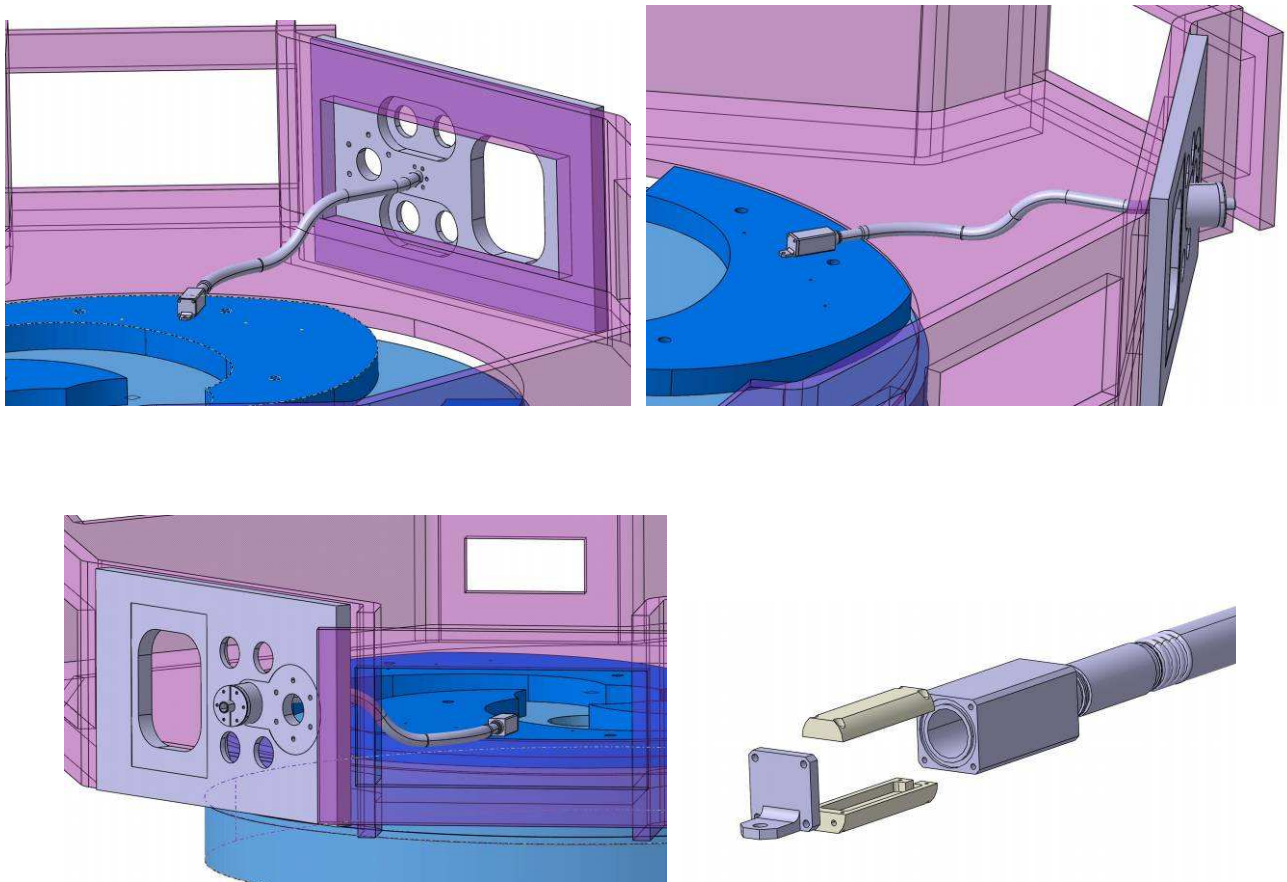


Figure 5-13 : représentation en CAO de la mécanique de positionnement de la sonde de I2 et de sa position sur le pôle spiralé dans la chambre à vide.

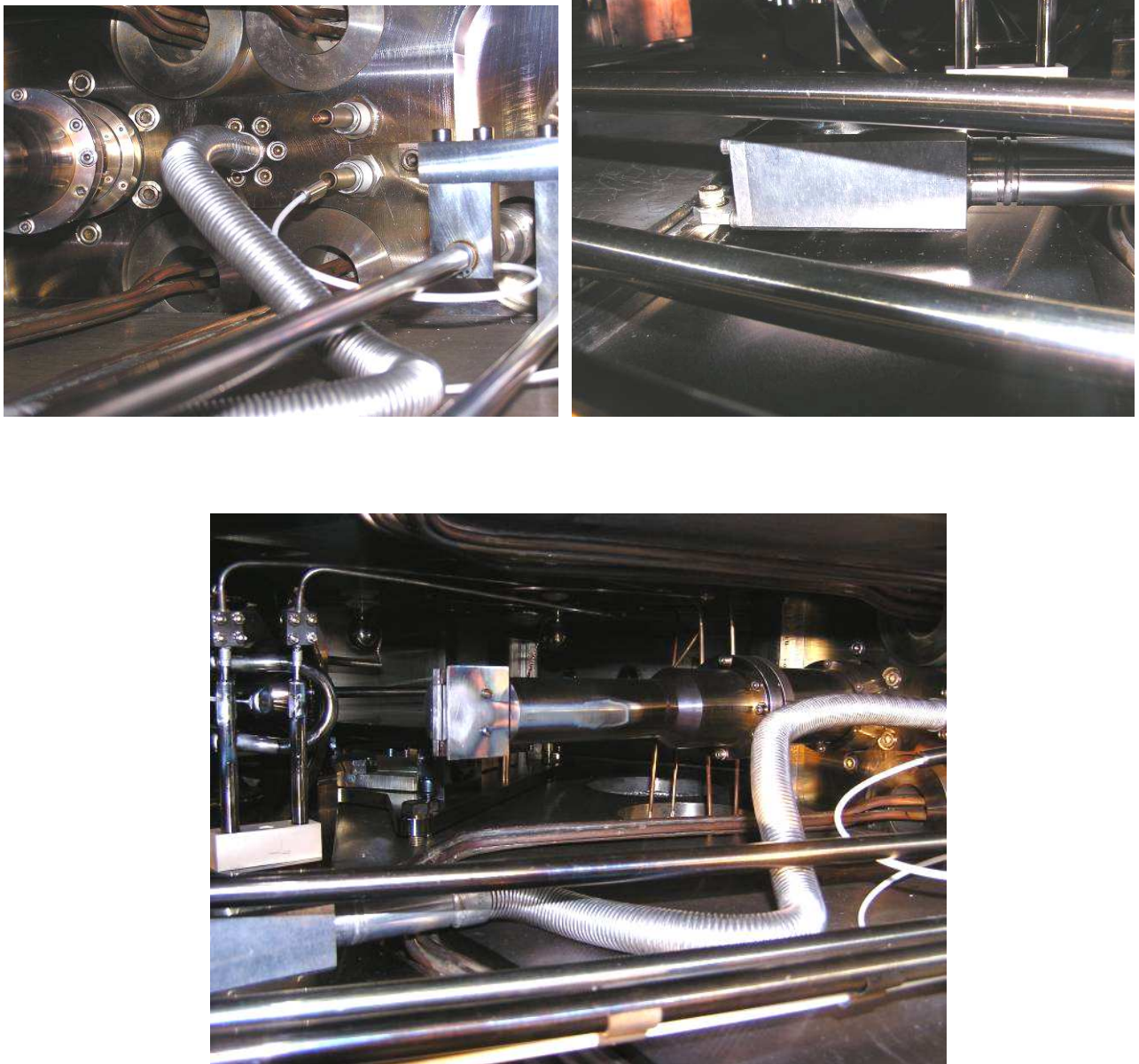


Figure 5-14 : Photos de la mécanique de positionnement de la sonde de I1

Comme on peut le voir sur les photos, de nombreux équipements encombrent la chambre à vide. Le tuyau souple en inox convient parfaitement pour passer entre ces objets sans gêner le faisceau.

Ce système par sondes de Hall a permis de compléter le premier système décrit, et ainsi équiper l'ensemble des dipôles. Cette mesure n'est que relative mais un étalonnage avec une sonde RMN dans un dipôle proche permettrait de la rendre absolue.

Conclusion

La mesure du champ magnétique en ligne au GANIL s'inscrit dans la problématique du réglage et de la surveillance de ce champ.

Les systèmes développés permettent une mesure automatique en aveugle, ce qui d'ailleurs a longtemps perturbé les utilisateurs, habitués à une visualisation du signal de résonance et à une recherche manuelle. Il a fallu prouver, surtout aux physiciens, la validité de nos résultats, voire leur proposer certaines fonctionnalités répondant à leur souci de suivre en ligne les variations du champ magnétique.

Ce temps d'adaptation passé, le système a fait désormais ses preuves et permet de gagner en stabilité de réglages pour le faisceau destiné aux salles d'expériences. De plus il fait surtout gagner du temps lorsqu'il s'agit de revenir à un réglage antérieur, à la suite par exemple d'arrêts intempestifs d'équipements.

Le travail mené est au carrefour de plusieurs domaines de compétences du GANIL :

- Les techniques de vide, pour les passages étanches autour des chambres à vide.
- la radioprotection, pour la tenue des sondes vis-à-vis des rayonnements induits par le faisceau.
- la mécanique, pour l'étude, la réalisation et le montage des ensembles de positionnement.
- l'électronique et l'informatique pour les réalisations matérielles et logicielles.

L'ensemble est caractéristique de la gestion de projets complexes se déroulant au sein d'un grand laboratoire, avec ses contraintes de planning de développement, de disponibilité des collaborateurs, de programmation des budgets, le tout dans le respect du planning de fonctionnement de l'accélérateur.

Le champ magnétique, grâce à ces systèmes de mesure et de surveillance est devenu un paramètre stable et bien maîtrisé. Plusieurs équipements actuellement en place font l'objet de développements de la part des fabricants, visant à améliorer leur performances, en particulier du point de vue de la sensibilité aux inhomogénéités. Si ces progrès sont avérés, ces magnétomètres de nouvelle génération pourront être intégrés au système en place.

Annexe

Annexe 1 : - *Principales caractéristiques du teslamètre METROLAB PT2025.*

Annexe 2 : - *Bobines plates de compensation de gradient.*

Annexe 3 : - *Document préliminaire concernant le futur METROLAB PT2026.*

Annexe 4 : - *Fiche technique du capteur de Hall SENIS YM 12-3-2-2T.*

Annexe 5 : - *Mise en œuvre du capteur YM 12-3-2-2T.*

Annexe 6 : - *Plan de câblage du magnétomètre de Hall.*

Annexe 7 : - *Fiche technique du capteur de température SGS – THOMSON LM 335.*

Annexe 8 : - *Caractéristiques du tiroir VME ADC - 3122*

Annexe 1

METROLAB

Instruments SA

**NMR TESLAMETERS
HIGH PRECISION****PT 2025
BENCH UNIT**

2025/00/4

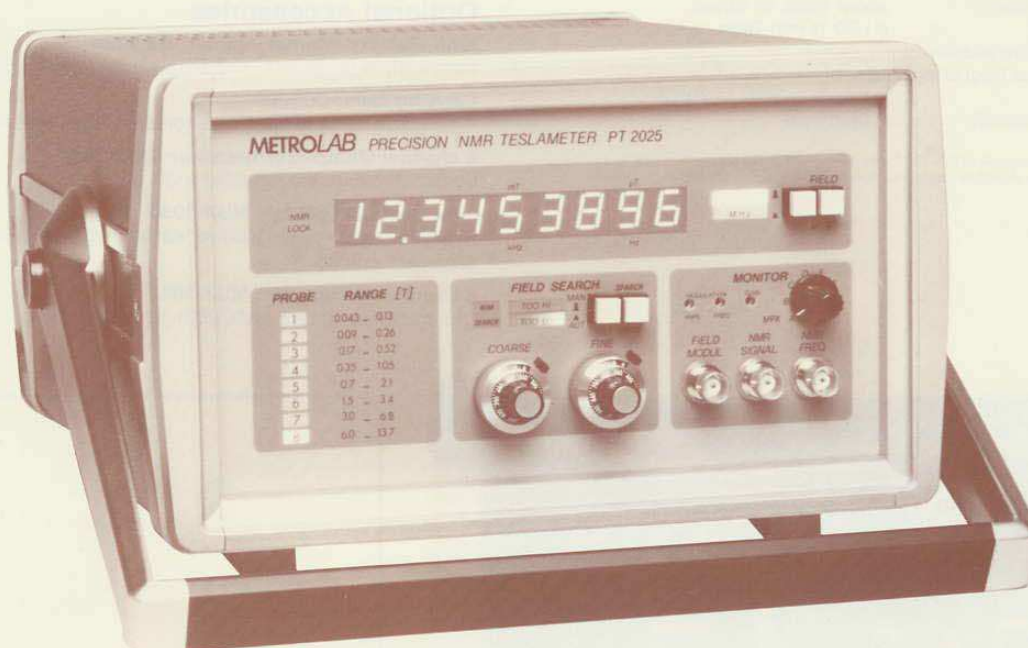
The PT 2025* is a high precision, microprocessor controlled and fully programmable NMR Teslameter, especially suited for any application where rapid, fully automatic and very accurate measurements of magnetic fields are of primary importance, such as MRI, accelerator beam handling, magnetic sensors calibration, etc.

- Easy to use bench type instrument
- Automatic search and tracking on the full probe range (or ranges: Multiplexer)
- High reliability
- Fully programmable, directly remote controllable
- Possibility to drive an external 8 channel Multiplexer
- High precision, independently of temperature
- Field Regulation Option (RG 2040)

Field range: 0.011 to 13.7 Tesla

Resolution: 10^{-7} T or 1 Hz

Digital Interfaces: IEEE 488 and RS 232C



*Based on a CERN design: Report 77-19 - K. BORER, G. FREMONT.

110, ch. du Pont du Centenaire CH-1228 Geneva Switzerland tel: +41 (22) 884 33 11
fax: +41 (22) 884 33 10 e-mail: contact@metrolab.ch web: www.metrolab.com

MAIN UNIT PT 2025: SPECIFICATIONS

Interfaces

IEEE 488 and RS 232C IEEE 488 optional (on request)

ALL front panel functions are programmable:

MHz or Tesla display reading
Field Polarity setting
Frequency setting
Field Search and Lock
External Multiplexer driving

Field Search and Lock

Auto mode

The PT 2025 sweeps the radio frequency over the whole range of the FINE potentiometer (typically $\pm 5\%$ of the COARSE setting)

Search mode

In this mode the microprocessor takes control of all the front panel commands rendering them inoperative. Simultaneously an automatic field search is activated. The entire range of the probe is scanned (from bottom to top) until the NMR signal is seen; at which point the PT 2025 "locks" on to the signal.

Noise and interference signals are detected and by-passed by the search algorithm.

Once the PT 2025 has "locked" on to a signal the search algorithm can follow the field over the whole probe range. When connected to a computer and with the aid of the probe multiplexer, the PT 2025 can be programmed to search for a field over several probes and to track it.

Specifications

Measurement principle: NMR (nuclear magnetic resonance of protons ^1H or deuterons ^2H)
Field range: 0.011 T* - 13.7 T
Absolute accuracy: better than ± 5 ppm (^1H)
Relative accuracy: better than ± 0.1 ppm
Display: $8\frac{1}{2}$ digits, Tesla or MHz
Resolution: 10^{-7} T or 1 Hz
Tracking rate: max. 1%/sec.
Time lag: 17ms. or less
Reading rate: about 1/sec. or 10/sec.
Reading: 9 LED 11 mm Tesla or MHz
Temperature stability of the internal frequency counter: ± 1 ppm (-20°C to 70°C)
Aging (counter): 2 ppm/year

* Standard range: 0.043T - 13.7T with 8 probes. For exact specifications and price information of probes measuring down to 0.011T please contact manufacturer.

Outputs

Monitoring outputs (front panel)

Field modulation: BNC
NMR signal: BNC
NMR frequency: BNC

Outputs (rear panel)

RF output to amplifier: BNC
Power to amplifier: LEMO 8 pins
Multiplexer: LEMO 4 pins
IEEE 488 and RS 232C: standard connectors

General

Power requirement: 40VA: 110/220 Volts 50/60Hz
Operating temperature: 10 to 40°C
Storage temperature: -20 to $+70^\circ\text{C}$, except ^2H probes: 5 to 70°C
Magnetic environment: 0.1 Tesla max. for main unit; 1 T for the Mux/Amplifier
Dimensions: 260 x 145 x 340 mm
Enclosure: non magnetic
Weight: 6.8 kg (15 lb)
Warranty: 1 year

Accessories required

Cable to Amplifier or Multiplexer: 1010 or 1011
Amplifier or Multiplexer: 1030 or 2031
Probes (integral 7m length cable): 1060/1080

NMR Field Regulation RG 2040

The optional plug-in module RG 2040 is a major addition to the PT 2025 Teslameter. It provides closed loop long term stabilization of magnetic fields and permits a full MPS (Magnet Power Supply) control (refer to the RG 2040's specifications)

Optional Accessories

High stability internal counter: HS 2060

(temperature coefficient: $< \pm 5$ ppb/ $^\circ\text{C}$; aging: $< \pm 2$ ppb/day)

Carrying case: CC2020

A light case for hand carrying a complete NMR Teslameter system.

8 channel Multiplexer/Amplifier: MUX 2031

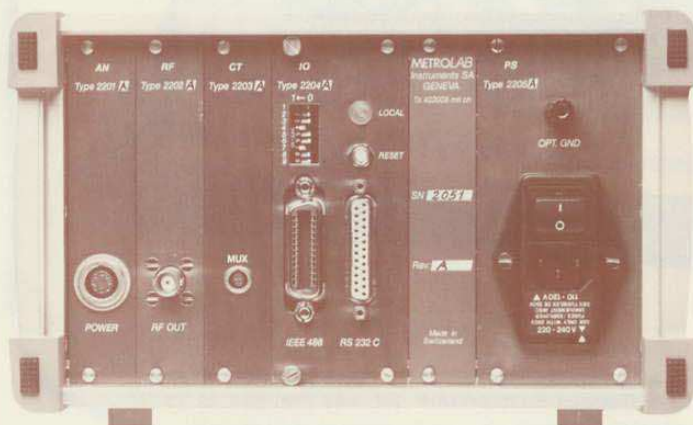
Does not require the Amplifier 1030

8 channel Multiplexer: MUX 2030

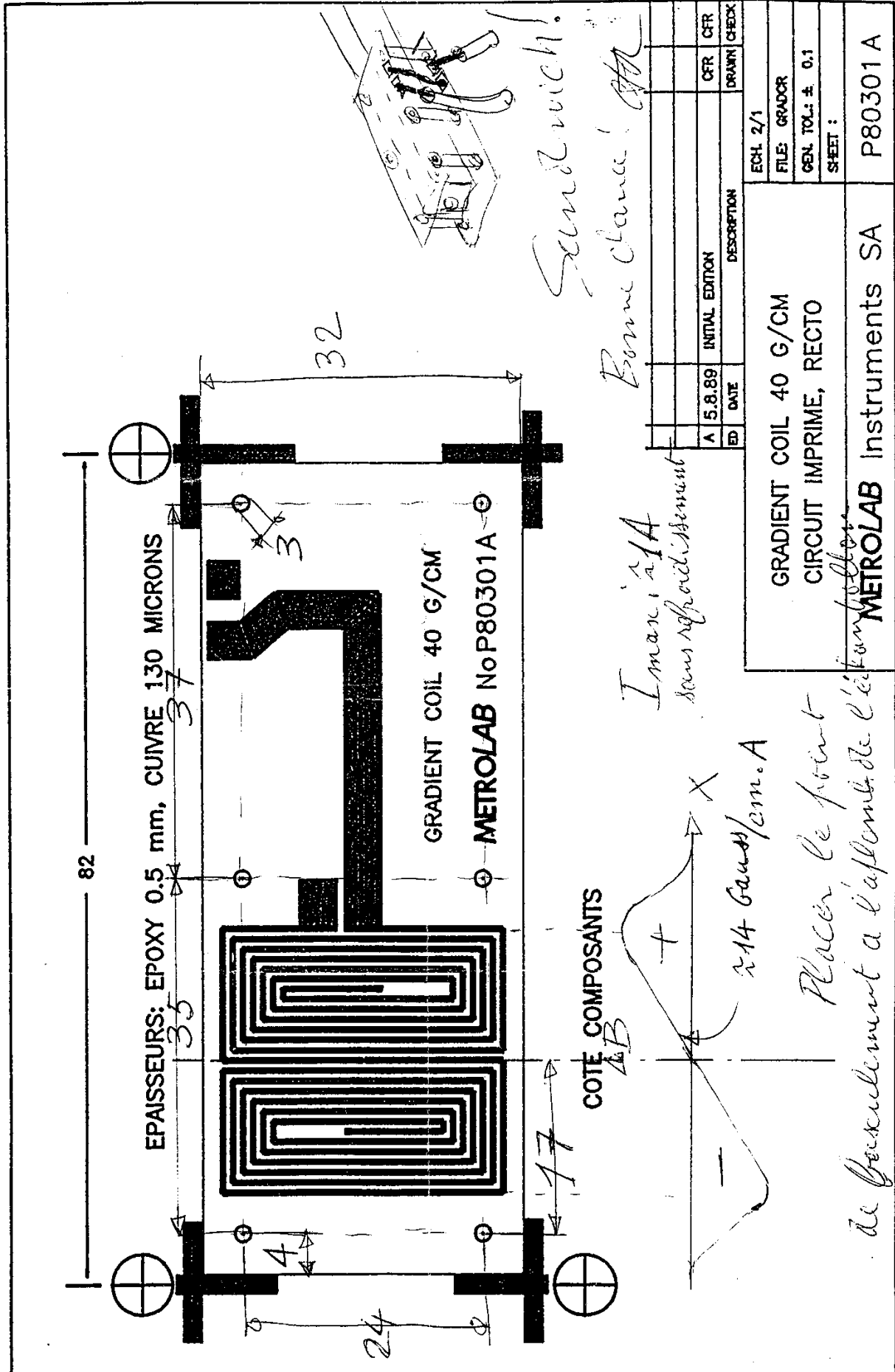
Requires one Amplifier 1030 for each channel, suitable for widely separated probes.

8 channel Multiplexer: MUX 2032

Can multiplex up to 8 MUX 2031 (consult factory).



Annexe 2



Annexe 3 PRELIMINARY



NMR PRECISION TESLAMETER PT 2026

05/05

METROLAB introduces the successor to the PT 2025, the world's leading NMR Precision Teslameter. Fully digital signal processing supports two channels and provides more than ten times better measurement resolution. New high-reliability, solid sample proton probes measure fields of up to 20 T, with a field range of up to 10:1. USB and Ethernet interfaces enable convenient local or remote field measurement for ramping, stability, mapping and calibration applications.

Fields up to 20 T (800 MHz p):

- Full range with robust, easy to use proton probes
- New wide range probes cover a 10x range, e.g. 0.2 – 2T
- Two measurement channels can be used as 2:1 multiplexer or for simultaneous measurements
- Unprecedented precision:
 - absolute accuracy $< \pm 5$ ppm
 - relative accuracy $< \pm 0.1$ ppm
 - measurement resolution ± 0.01 ppm
 - display resolution 0.01 ppm
- Inhomogeneous fields: up to 4000 ppm/cm
- Measurement rates up to 60 measurements/s
- Automatic tracking: 100% of probe range, max rate 4%/s
- Stability: reference clock ± 0.05 ppm, ageing $< \pm 5$ ppb/day



Color touch screen:

- Modern graphical user interface provides intuitive control over all instrument parameters
- Context-dependant on-line help is always available
- Large, easy to read numeric display
- Extensive additional information such as: standard deviation, time stamp, field uniformity estimate, etc.
- Scrolling graphical display simplifies stability measurements
- "Scope" display of NMR signal for difficult signal conditions
- Alarm function alerts operator when field reaches critical value
- Measurements can be logged and reviewed locally, or sent off-site via e-mail for remote monitoring
- Measurement setups can be saved and recalled
- Instrument can be time-shared in round-robin fashion between multiple measurement tasks
- Groups of probes can be treated as single channel
- Optional "black box" configuration without display

Plug & work:

- Expansion slot (figure shows planned built-in 8-channel mux)
- Ethernet, USB and RS-232 interfaces
- Complies with all major instrumentation standards: IEEE 488.2, VXI11, USBTMC, SCPI, and VXI11np
- Includes LabVIEW instrument driver
- PT 2025 compatibility mode
- Convenient new probe connector supports all probes, amplifiers, and multiplexers (adaptor for PT 2025 compatibility)
- Trigger input allows precise synchronization
- Reference frequency and NMR signal outputs allows access to analog signals

Robust industrial design:

- No air inlet allows reliable operation in industrial environments
- Operating temperature 10 to 40 °C
- Magnetic environment 0.2 T max
- Power requirements: 50 W, 90 – 255 VAC (optional 24 VDC)
- Dimensions 210W x 125H x 324D (mm)

110, ch. du Pont du Centenaire CH-1228 Geneva Switzerland tel: +41 (22) 884 33 11
fax: +41 (22) 884 33 10 e-mail: contacts@metrolab.ch web: www.metrolab.ch

Annexe 4

SENIS**Single Axis Magnetic Field Transducer YM12-3-2-2T**

The Model YM12-3-2-2T is a single-axis, 0.1% accuracy, high linearity, high stability magnetic field to analog voltage Transducer. It is particularly appropriate for mapping the magnetic field in the range to 2 Tesla.

A novel SENIS sensor chip in the probe entirely eliminates influences from DC magnetic field components other than the one measured (Y-axis), so that even for strong non-uniform fields **no planar Hall effect** leads to errors in the output voltage. The transducer consists of two modules connected by a flexible cable C1 (see Fig.1). The magnetic field sensitive module H contains a high quality Hall element. To build up a complete measurement system, connect the module E with a simple power supply and a voltmeter.

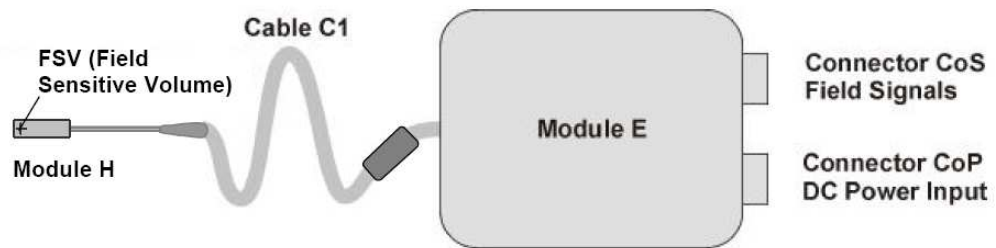


Figure 1: Structure of the Single-Axis Magnetic Field Hall Transducer YM12-3-2-2T

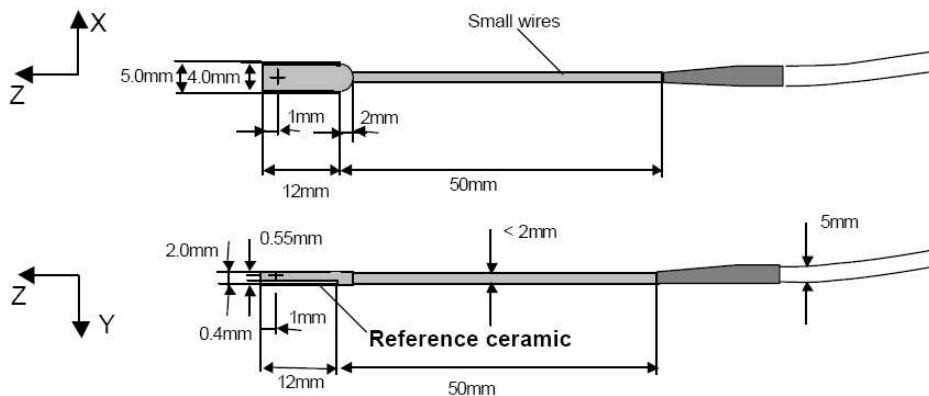


Figure 2: Probe dimensions and position of the active zone for the Single-Axis Magnetic Field Hall Transducer YM12-3-2-2T (module H)

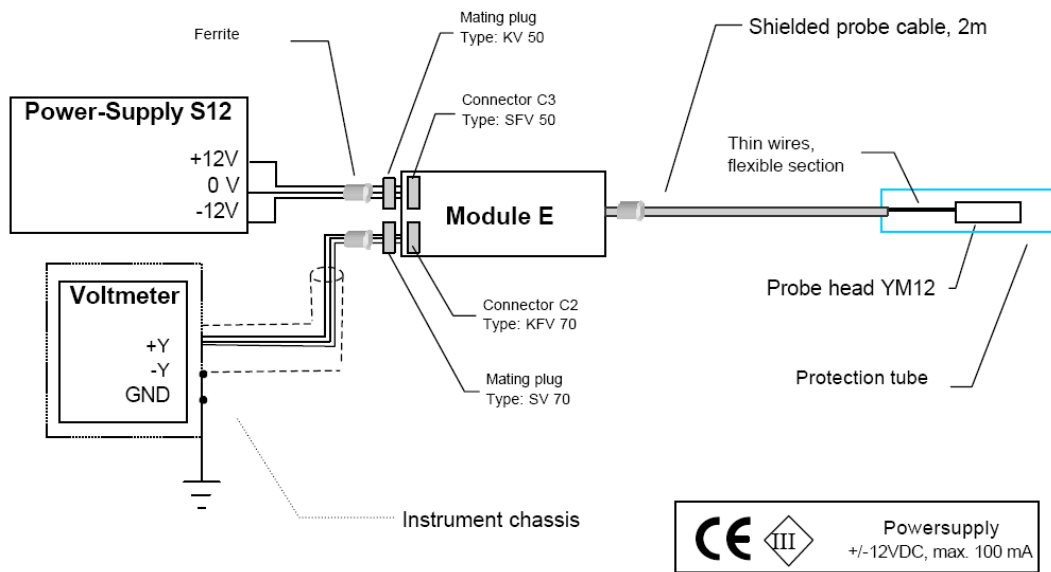
Specifications

(Specifications are given at a nominal operating temperature (23°C) and after a warm-up time of 10 minutes.)

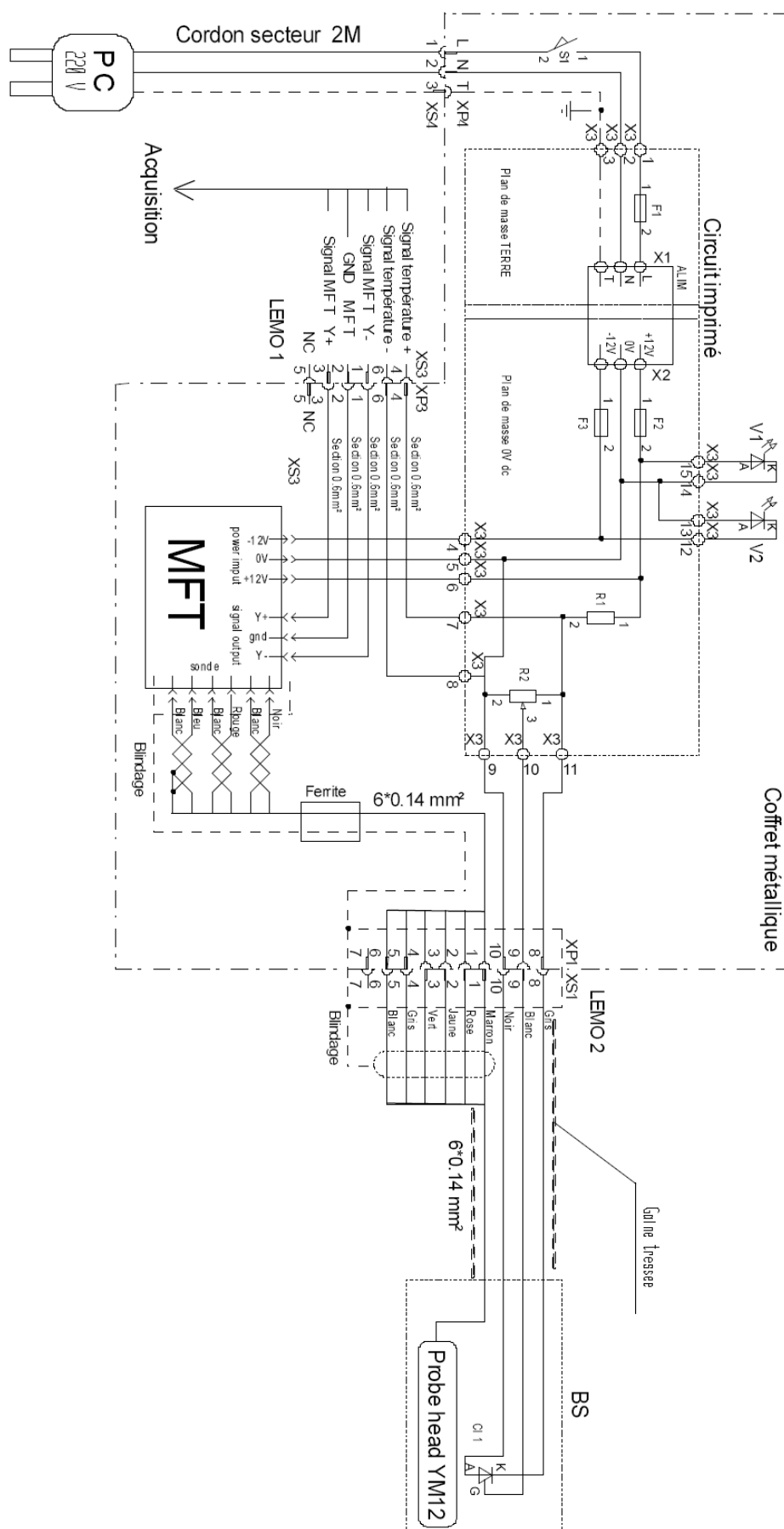
Output signal for channel Y:

Maximum magnetic field	± 4 T
Linear magnetic field range	± 2 T (full scale)
Output voltage at full-scale (VB)	±10.000V, differential
Sensitivity to magnetic field	5 V/T (0.5mV/G)
Tolerances of sensitivity (B = 1T)	± 0.1 %
Non Linearity of output	(B ≤ 1T) < 0.05 % (B ≤ 2T) < 0.1 %
Long term instability	< 1 % over 10 years
Temp. coefficient of sensitivity (T= 23 ± 10°C)	< 100 ppm /°C

Annexe 5

*Figure 3: Set-up for all EMC-test*

Annexe 6



Annexe 7



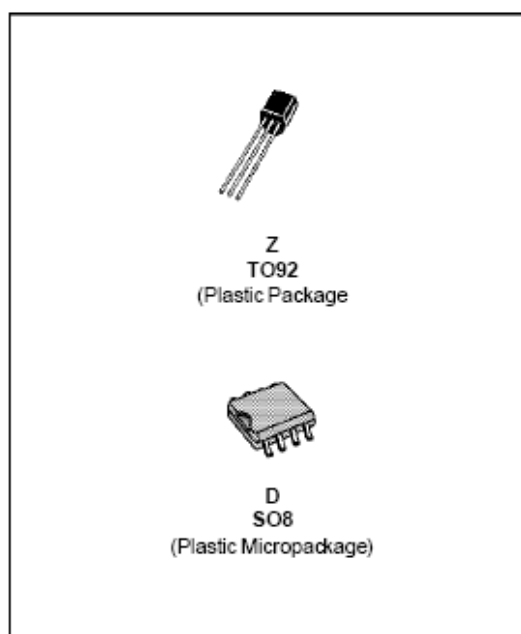
LM135 LM235-LM335,A

PRECISION TEMPERATURE SENSORS

- DIRECTLY CALIBRATED IN °K
- 1°C INITIAL ACCURACY
- OPERATES FROM 450µA TO 5mA
- LESS THAN 1Ω DYNAMIC IMPEDANCE

DESCRIPTION

The LM135, LM235, LM335 are precision temperature sensors which can be easily calibrated. They operate as a 2-terminal Zener and the breakdown voltage is directly proportional to the absolute temperature at 10mV/°K. The circuit has a dynamic impedance of less than 1Ω and operates within a range of current from 450µA to 5mA without alteration of its characteristics. Calibrated at +25°C, the LM135, LM235, LM335 have a typical error of less than 1°C over a 100°C temperature range. Unlike other sensors, the LM135, LM235, LM335 have a linear output.

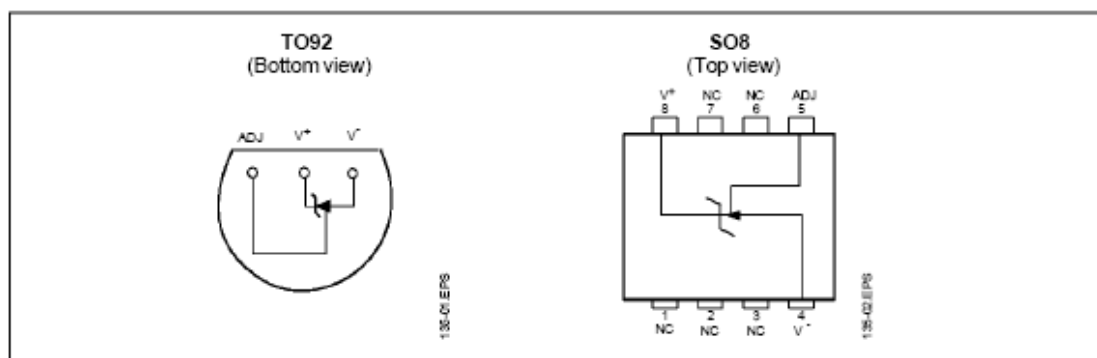


ORDER CODES

Part number	Temperature Range	Package	
		Z	D
LM135	-55°C, +150°C	•	•
LM235	-40°C, +125°C	•	•
LM335,A	-40°C, +100°C	•	•

135401TB

PIN CONNECTIONS



LM135-LM235-LM335,A

TEMPERATURE ACCURACY

Parameter	LM135 - LM235 LM335A			LM335			Unit
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Operating Output Voltage $T_{case} = +25^{\circ}\text{C}$, $I_R = 1\text{mA}$	2.95	2.98	3.01	2.92	2.98	3.04	V
Uncalibrated Temperature Error ($I_R = 1\text{mA}$) $T_{case} = +25^{\circ}\text{C}$ $T_{min.} \leq T_{case} \leq T_{max.}$		1 2	3 5		2 4	6 9	$^{\circ}\text{C}$
Temperature Error with 25°C Calibration $T_{min.} \leq T_{case} \leq T_{max.}$, $I_R = 1\text{mA}$		0.5	1.5		1	2	$^{\circ}\text{C}$
Calibrated Error at Extended Temperature $T_{case} = T_{max.}$ (intermittent)		2			2		$^{\circ}\text{C}$
Non-linearity ($I_R = 1\text{mA}$)		0.3	1		0.3	1.5	$^{\circ}\text{C}$

135-03 TBL

ELECTRICAL CHARACTERISTICS - (note 1)

Parameter	LM135 - LM235			LM335,A			Unit
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Operating output voltage change with current $450\mu\text{A} \leq I_R \leq 5\text{mA}$ at constant temperature		2.5	10		3	14	mV
Dynamic Impedance ($I_R = 1\text{mA}$)		0.5			0.6		Ω
Output Voltage Temperature Drift		+10			+10		mV/ $^{\circ}\text{C}$
Time Constant		80			80		s
Still Air		10			10		
Air 0.5m/s		1			1		
Stirred Oil							
Time Stability ($T_{case} = +125^{\circ}\text{C}$)		0.2			0.2		$^{\circ}\text{C}/\text{kh}$

135-04 TBL

Note : 1. Accuracy measurements are made in a well-stirred oil bath. For other conditions, self heating must be considered.

Annexe 8

Thomas Jefferson National Accelerator Facility


[Jefferson Laboratory](#)

[Free Electron Laser Project](#)

[B.A.I.R.](#)

[Fast Find Table](#)
[VME Cards \(6U\)](#)
[Cards Used in VME Crates \(6U\)](#)

VMIC-3122

64 Channel, 16-Bit D/A Converter

- **Manufactured by:** VME Microsystems International Corporation - 12090 South Memorial Parkway - Huntsville, Alabama 35803-3308 - For ordering information call 1-800-880-0444 or 1-205-880-0444, FAX (205) 882-0859
- **64 inputs/16 Bit ADC (Analog to Digital Converter)**
- **A/D Ranges of 0 to +5V, 0 to +10V, +/-2.5V, +/-5V, and +/-10V**
- **1,024-Word Data Buffer (16-Word Deep Buffer in 64 Channels)**
- **Software-selectable conversion rate (up to 100 kHz)**
- **Program-selectable scanning of 1, 8, 16, 32, or 64 channels**
- **Continually digitizes selected input channels and stores the results**
- **Three trigger modes (Software, external, or interval timer)**
- **Three scan modes (Autoscan, single scan, random access)**
- **Programmed VMEbus interrupts**
- **User-programmable interval timer**
- **Software-programmable gain 1 and 10**
- **Overvoltage protected inputs**
- **Selectable output coding**
- **Powers up in autoscanning mode with unity gain**
- **VMEbus Compliance:** The VMIVME-3122 complies with VMEbus specification ANSI/IEEE STD 1014-1987 IEC 821 and 297 with the following mnemonics: A32/A24/A16:D16/D8 (EO) DTB Slave, Interrupter I(1 to 7) ROAK (DYN), Interrupter Vector: D08 (O) (DYN), 6U Form Factor
- **Data Ready Flag:** A data ready flag in the CSR is set when the data buffer is filled (endscan) or half-filled (midscan).
- **Interval Timer:** Timed intervals of up to 687 seconds are provided by a programmable interval timer.
- **Accuracy:** Maximum error = +/-0.005 percent Reading +/-0.005 percent range +/-100uV
- **Stability:** Temperature drift, per degree Celsius = +/-10 PPM RDG +/-7.5 PPM range +/-2.5uV
- **Input Noise:** (0.4 +0.3/G)mV; where G = PGA Gain
- **Input Bias Current:** 40nA maximum at zero input
- **Input Impedance:** 5 Mohm minimum in parallel with 50 pF
- **Temperature:** 0 to 65 °C (standard VME slot) operating, -40 to 85 °C storage
- **Humidity:** 10 to 80 percent relative, noncondensing
- **Altitude:** Operation up to 3,000 m
- **Cooling:** Forced air convection (Standard VME slot)
- **Dimensions:** Double height eurocard (6U) board, 160 x 233.35 mm
- **Weight:** 700g maximum
- **Power Requirements:** 7.0A (maximum) at +5 VDC

Bibliographie et références.

- [1] - <http://www.ganil.fr/>
- [2] - BRUCK H.; *Accélérateurs circulaires de particules*; Presse Universitaires de France; 1966.
- [3] - KVITKOVIC; *Hall generators*; CERN Accelerator School; Genève; S.TURNER; avril 1997.
- [4] - HENRICHSEN K., REYMOND C., TKATCHENKO M.; *Methods and instruments for magnetic field measurement*; CERN Accelerator School; Genève; S.TURNER; sept. 1992.
- [5] - ASCH Georges; *Les capteurs en instrumentation industrielle*; DUNOD; 1991.
- [6] - FREMONT Guy ; *Magnétomètre à résonance nucléaire* ; Mémoire d'ingénieur CNAM ; Mars 79.
- [7] - REYMOND Claude; *Magnetics resonance techniques*; CERN Accelerator School; Genève S.TURNER; avril 1997.
- [8] - PLATZER Nicole – DALLEY Laurence ; *Résonance Magnétique Nucléaire – Aspects théoriques* ; Techniques de l'Ingénieur - P 2 880
- [9] - METROLAB instrument SA, User's Manuel PT 2025 NMR Teslameter
- [10] - <http://www.metrolab.ch>
- [11] - <http://www.ni.com>
- [12] - PETTERSON Wade; *Le guide du bus VME* ; VITA ; 1991
- [13] - <http://www.senis.ch>.

MESURES EN LIGNE DU CHAMP MAGNETIQUE DU G.A.N.I.L.

Mémoire d'ingénieur C.N.A.M., Caen-2008

La mesure en ligne du champ magnétique des électroaimants du Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) a été étudiée et mise au point. Elle permet le réglage et la surveillance des paramètres de conduite du faisceau, de l'accélérateur aux salles d'expériences. Les développements ont été menés autour de magnétomètres à Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) et de magnétomètres à effet Hall.

Les limitations de fonctionnement des sondes RMN en zone de champ inhomogène ont nécessité des solutions particulières. Des techniques de positionnement et de compensation de gradient adaptées ont été mises en œuvre.

Les sondes RMN et à effet Hall sont intégrées dans une électronique d'acquisition et de traitement définie selon les standards du GANIL. L'ensemble constitue une instrumentation qui répond parfaitement aux besoins, en particulier du point de vue de la mesure et de la surveillance des paramètres magnétiques.

Mots clés : Accélérateur - Electroaimants - Mesure de champ magnétique – Sonde RMN – Sonde de Hall.

ON-LINE MEASUREMENT OF MAGNETIC FIELDS AT GANIL

On-line measurement of the magnetic fields of electromagnets at GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) was studied and developed. This allows the adjustment and the monitoring of the parameters which control the transport of particle beams from the accelerators to the experimental vaults. The developments were based on nuclear magnetic resonance (NMR) magnetometers and Hall-effect magnetometers.

The limitations of operating NMR probes in inhomogeneous fields required particular solutions. Techniques of positioning and appropriate compensation for field gradients were put in place.

NMR probes and Hall-effect probes are integrated into the electronics for monitoring and control according to the defined standards at GANIL. The unit comprises instrumentation which perfectly meets the needs, particularly from the point of view of the measurement and the monitoring of the magnetic parameters.

Key words: Accelerator - Electromagnets - Magnetic field measurement – NMR probe - Hall probe.